

RESUM

La predicció de l'evolució d'un incendi i el comportament del foc presenta encara a dia d'avui reptes científics i tecnològics importants. És per aquest motiu que no s'ha aconseguit crear encara un simulador d'incendis forestals que sigui adequat per diferents tipus d'escenaris, vegetació i condicions atmosfèriques. El simulador d'incendis forestals *Wildland-urban interface Fire Dynamics Simulator – WFDS* – es troba actualment en constant evolució, fet que fa que sigui necessària una validació global i dels seus diferents components de manera més concreta per aconseguir omplir aquest buit. L'objectiu d'aquest projecte és contribuir en la tasca de validació de WFDS, tot duent a terme una revisió detallada de la definició de la força d'arrossegament implementada al model del simulador i un estudi de simulació per a analitzar-ne la seva bondat.

El projecte consta d'una breu introducció al simulador WFDS on s'explica l'estructura del model matemàtic. Tot seguit, s'aborda el fenomen de l'arrossegament, inicialment des d'un punt de vista teòric – la definició física de la força – fins a la consideració que se'n fa en l'àmbit de l'enginyeria química, on és present en la majoria d'operacions bàsiques. A més a més, s'estudia com es defineix la força d'arrossegament al model matemàtic de WFDS i les opcions que té l'usuari del simulador per a especificar, la seva modelització. S'analitzen dues formes diferenciades a WFDS per definir la força d'arrossegament: mitjançant la definició d'una constant d'arrossegament i la geometria de les partícules o bé fixant un valor constant del producte de la constant i el coeficient d'arrossegament.

Per tal de determinar la forma idònia per definir la força d'arrossegament s'han dut a terme uns experiments a escala de laboratori amb palla d'ordi com a combustible. En aquestes cremes es caracteritza el llit de combustible i es determina la velocitat de propagació del foc. Els escenaris de laboratori es reproduïen amb el simulador WFDS tenint en compte les diferents opcions per definir la força d'arrossegament. S'escullen 5 escenaris diferents: a partir del càlcul de la constant d'arrossegament i utilitzant una correlació per definir el coeficient d'arrossegament característica per partícules cilíndriques i per partícules esfèriques, respectivament; a partir de l'estimació del nombre de Re i calculant el producte de la constant i el coeficient d'arrossegament considerant el combustible com partícules cilíndriques, com partícules esfèriques o com un llit empaquetat a partir de la correlació empírica d'Ergun, respectivament. Les tres últimes opcions requereixen la determinació de la velocitat de l'aire per tal de poder estimar el nombre de Re i estableixen com a paràmetre constant el coeficient d'arrossegament, que per definició varia en funció del règim i el tipus de partícula.

L'estudi revela que és necessari un grau de precisió molt elevat per determinar la velocitat de l'aire per calcular el nombre de Re i que, a no ser que es disposi de la tecnologia adequada, és més adient

introduir la constant d'arrossegament i la geometria de la partícula. També posa de manifest que, tot i que el combustible experimental té una geometria cilíndrica, no hi ha diferències significatives quan aquest es simula com a tal o com a geometria esfèrica. Dels dos blocs experimentals estudiats, se n'ha aconseguit simular correctament un dels dos i s'ha corroborat que la força d'arrossegament no és un paràmetre decisiu a l'hora d'aconseguir resultats més acurats, sinó que és més important ser precís en l'avaluació d'altres paràmetres. En aquest sentit, cal assenyalar la necessitat d'especificar correctament la velocitat de màxima de crema, que s'ha detectat com a sensible a mesura que s'augmenta les dimensions del llit de combustible.

SUMARI

RESUM.....	1
SUMARI	3
1 PREFACI	7
2 INTRODUCCIÓ.....	9
2.1 OBJECTIUS	9
2.2 ABAST	9
2.3 FINALITAT	9
3 ANTECEDENTS	11
3.1 CONTEXT: ELS SIMULADORS FÍSICS.....	11
3.2 WFDS.....	11
3.2.1 INTRODUCCIÓ.....	11
3.2.2 ESTRUCTURA DEL MODEL MATEMÀTIC.....	11
3.3 ESTUDIS PREVIS	15
4 FONAMENTS TEÒRICS DE LA FORÇA D'ARROSSEGAMENT	17
4.1 MODELITZACIÓ TEÒRICA.....	17
4.1.1 DEFINICIÓ PER UNA PARTÍCULA.....	17
4.1.2 DEFINICIÓ PER LLITS DE PARTÍCULES	19
4.2 LA FORÇA D'ARROSSEGAMENT PER WFDS	20
5 DESCRIPCIÓ DE LA INSTAL·LACIÓ EXPERIMENTAL I DE LES PROVES REALITZADES.....	25
5.1 DESCRIPCIÓ GENERAL DE LA INSTAL·LACIÓ EXPERIMENTAL	25
5.1.1 TAULA DE COMBUSTIÓ	25
5.1.2 EQUIPS DE MESURA	26
5.2 DISSENY EXPERIMENTAL	27
5.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	28
5.4 RESULTATS I DISCUSSIÓ	30

5.4.1 CARACTERITZACIÓ DE L'ESCENARI D'EXPERIMENTACIÓ	30
5.4.2 CÀLCUL DE LA VELOCITAT DE PROPAGACIÓ.....	31
6 LA SIMULACIÓ DE LA FORÇA D'ARROSSEGAMENT.....	35
6.1 DEFINICIÓ DE L'ESCENARI DE SIMULACIÓ	35
6.1.1 CARACTERÍSTIQUES GEOMÈTRIQUES.....	35
6.1.2 DEFINICIÓ DEL COMBUSTIBLE	36
6.1.3 VARIABLES DE SORTIDA.....	40
6.2 DISSENY DE LES SIMULACIONS	41
6.2.1 CÀLCUL DELS PARÀMETRES RELATIUS A L'ARROSSEGAMENT	41
6.2.2 DISSENY DE LES SIMULACIONS	42
6.3 RESULTATS I DISCUSSIÓ	44
7 ESTUDI DE SOSTENIBILITAT DEL PROJECTE	49
7.1 DESCRIPCIÓ GENERAL DEL PROJECTE.....	49
7.2 ESTUDI D'ALTERNATIVES	49
7.3 DESCRIPCIÓ DEL MEDI	49
7.4 IDENTIFICACIÓ I VALORACIÓ DELS IMPACTES SOBRE EL MEDI	49
7.4.1 CRITERIS D'AVUACIÓ	49
7.4.2 IDENTIFICACIÓ D'IMPACTES. LLISTA D'ACTIVITATS.....	50
7.4.3 IMPACTES AMBIENTALS POTENCIALS	51
7.4.4 VALORACIÓ DELS IMPACTES.....	52
7.5 MESURES PREVISTES	52
8 COST DEL PROJECTE.....	53
8.1 RECURSOS MATERIALS	53
8.2 RECURSOS HUMANS.....	54
8.3 COST TOTAL	54
9 PLANIFICACIÓ	55
CONCLUSIONS	57
REFERÈNCIES BILIOGRÀFIQUES	59

NOMENCLATURA	63
A. CARACTERITZACIÓ DEL COMBUSTIBLE	65
A.1. EQUIPS DE MESURA	65
A.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	65
A.3. RESULTATS I DISCUSSIÓ	66
B. FITXER D'ENTRADA WFDS	71
C. ALGORITME 'Ros.m'	75
D. DETERMINACIÓ DE LA VELOCITAT D'ENTRADA D'AIRE A LA FLAMA.....	77
D.1. DESCRIPCIÓ GENERAL DE LA INSTAL·LACIÓ EXPERIMENTAL	77
D.2. DISSENY EXPERIMENTAL	77
D.3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	78
D.4. RESULTATS I DISCUSSIÓ	78
E. DETERMINACIÓ DE LA SENSIBILITAT DE LA VELOCITAT MÀXIMA DE CREMA	81
E.1. METODOLOGIA DE L'ANÀLISI DE SENSIBILITAT.....	81
E.2. DISSENY DE LES SIMULACIONS.....	81
E.3. RESULTATS I DISCUSSIÓ	82

1 PREFACI

Els incendis forestals són malauradament notícia cada estiu a la zona del mediterrani. L'incendi forestal és la propagació violenta i descontrolada d'un foc. Pot afectar, no només a zones de massa boscosa, sinó a habitatges o nuclis urbans propers al bosc. A més, pot causar la mort de persones i animals, la pèrdua de béns materials i té un impacte directe a l'ecosistema.

L'experiència dels bombers a l'hora d'enfrontar-se als incendis forestals ha permès disposar de plans d'emergència i protocols d'actuació eficients, però a dia d'avui, segueix essent difícil de preveure l'evolució d'un incendi amb antelació o, simplement, prevenir la seva ignició. Els imprevistos són, en moltes ocasions, mortals pel personal d'extinció. Per aquest motiu, el repte recau en conèixer profundament tots els fenòmens que tenen lloc en un incendi i ser capaços de descriure'ls acuradament.

Els incendis forestals integren processos físics i químics molt complexos, que comprenen des de fenòmens a escala microscòpica fins a escala real, amb interaccions entre ells, el terreny, l'atmosfera, la topografia, el combustible i el foc [1]. La dificultat de descriure cada procés que té lloc, així com d'integrar-los en un tot, fa que la simulació d'incendis forestals continuï essent un desafiament.

Malgrat que els models matemàtics que permeten predir el comportament del foc portin desenvolupant-se des dels anys 20, els simuladors d'incendis forestals són eines força recents. Els primers simuladors que es van desenvolupar, i els més utilitzats a nivell operacional, estan basats fonamentalment en models semi-empírics desenvolupats als Estats Units (per exemple FARSITE [2] i BehavePlus [3]). Són difícilment adaptables a altres zones del món. La tendència actual es centra, doncs, en desenvolupar simuladors de tipus físic [4], és a dir, basats fonamentalment en la resolució de balanços de matèria, energia i quantitat de moviment mitjançant la dinàmica de fluids computacional - CFD. Actualment els simuladors físics no són aplicables a nivell operacional per l'elevat temps de còmput que requereix aquesta tècnica.

La modelització física amb CFD d'incendis forestals és extremadament complexa. Això es deu principalment a la interacció entre fenòmens com la turbulència, les reaccions químiques, la transferència de calor i la degradació del combustible, que al ésser aquest darrer heterogeni inclou també la interacció i barreja amb l'aire atmosfèric.

La descripció correcta dels fenòmens que tenen lloc en un incendi forestal és una peça clau per aconseguir modelitzar el foc. No menys important és l'acoblament dels diferents fenòmens a un

sistema únic de modelització. En l'actualitat, les eines CFD de simulació d'incendis forestals es troben encara en procés de desenvolupament i validació i aquest treball és una aportació en aquest sentit.

En aquest projecte s'analitza el fenomen de l'arrossegament, és a dir, la resistència que el combustible oposa al flux d'aire amb el qual interacciona, implementat dins el simulador *Wildland-urban interface Fire Dynamics Simulator* – WFDS.

2 INTRODUCCIÓ

2.1 OBJECTIUS

L'objectiu general d'aquest projecte és revisar el tractament de la força d'arrossegament al simulador d'incendis forestals *Wildland-urban interface Fire Dynamics Simulator* – WFDS – mitjançant experiments realitzats a escala de laboratori.

Per tal d'assolir aquest objectiu, es realitza una revisió bibliogràfica sobre la definició de la força d'arrossegament tant pel que fa a l'equació implementada a WFDS com en l'àmbit més general de l'enginyeria química. S'avalua quina és la forma més idònia per definir la força d'arrossegament al simulador mitjançant la reproducció dels experiments realitzats a escala de laboratori. Finalment, es pretén donar un conjunt d'indicacions per tal que l'usuari pugui definir la força d'arrossegament segons l'escenari que es plantegi.

2.2 ABAST

Aquest projecte comprèn un estudi teòric del fenomen de l'arrossegament, un bloc d'experimentació de laboratori i un bloc de simulació amb posterior anàlisi de resultats i conclusions sobre de l'objecte d'aquest d'estudi.

2.3 FINALITAT

Mitjançant aquest projecte es vol contribuir en la tasca de validació del simulador d'incendis forestals *Wildland-urban interface Fire Dynamics Simulator* – WFDS –. La finalitat última és, doncs, aconseguir que el simulador sigui útil com a eina de suport pels mitjans d'extinció d'incendis, així com per l'estudi del fenomen del foc.

3 ANTECEDENTS

3.1 CONTEXT: ELS SIMULADORS FÍSICS

El desenvolupament de simuladors de tipus físic sorgeix entorn el 1990 amb la millora tecnològica de la capacitat dels ordinadors i l'increment d'eficiència del càlcul numèric. Els models que conformen aquests simuladors es basen en lleis físiques i resolen, mitjançant tècniques numèriques de certa complexitat, les equacions de conservació de la massa, l'energia i la quantitat de moviment. Els simuladors de tipus físic són capaços de proporcionar informació sobre qualsevol variable que intervé a l'incendi ja sigui la velocitat de propagació, el transport de fum, la temperatura de flama, el flux de calor, etc. Aquesta tipologia de simuladors requereixen, tanmateix una validació exhaustiva dels seus models matemàtics. Sullivan [4] presenta breument els diferents simuladors de tipus físic; entre ells cal destacar el FIRETEC [5] i WFDS [6]. FIRETEC i WFDS es troben en un estat permanent de revisió i millora i permeten la simulació d'escenaris en 3D. FIRETEC és un simulador dissenyat per simular fonamentalment incendis forestals a escales de paisatge, mentre que WFDS és adequat per escales petites i mitjanes. Ambdós simuladors són eines CFD. La dinàmica de fluids computacional – CFD – és una branca de la mecànica de fluids que utilitza mètodes numèrics i algoritmes per a la resolució i anàlisi de la dinàmica dels fluids. El fonament d'aquesta tècnica es basa en la resolució de les equacions de conservació de massa, energia i quantitat de moviment. Aquestes es sotmeten a un conjunt de simplificacions en funció de la naturalesa del problema, que diferencien una eina CFD, d'una altra. Per a la resolució computacional del model matemàtic es considera, en totes les eines CFD, que la geometria de l'escenari està definida, que el volum ocupat pel fluid es troba dividit en cel·les i que els contorns es troben definits. Finalment, és necessari un cert post-processament de les dades CFD per analitzar i visualitzar la solució resultant.

3.2 WFDS

3.2.1 INTRODUCCIÓ

Wildland-urban interface Fire Dynamics Simulator – WFDS versió 5.5.3.– [6] és una extensió de *Fire Dynamics Simulator* 5–FDS–[7] desenvolupat al *National Institute of Standards and Technology* – NIST, EUA conjuntament amb el *US Forest Service* que s'utilitza conjuntament amb *Smokeview* [8], desenvolupat també al NIST, per visualitzar els resultats obtinguts. Aquest programa genera les imatges i animacions dels resultats obtinguts pel model.

3.2.2 ESTRUCTURA DEL MODEL MATEMÀTIC

El model implementat a WFDS és idèntic en gran mesura al model de FDS. A diferència del model de FDS, WFDS incorpora la propagació del foc per a combustibles vegetals i permet realitzar simulacions

en ambients exteriors. El model es divideix en submodels que resolen els diferents fenòmens fisicoquímics. Inclou diferents simplificacions que redueixen el temps de còmput i que convé tenir present per conèixer les limitacions del simulador. Els models que conformen WFDS són: el model de la fase gasosa, el model del combustible sòlid, el model de combustió i descomposició tèrmica del combustible, el model radiatiu o transferència de calor per radiació i el tractament de la geometria.

Model de la fase gasosa

Les equacions de conservació de la massa, el moment i l'energia per a fluids Newtonians són les equacions principals que governen el model de WFDS. WFDS resol numèricament una forma de les equacions de conservació de Navier-Stokes per fluxos a baixa velocitat – i.e. números de Mach baixos – i conduïts tèrmicament. El model hidrodinàmic s'encarrega de modelitzar el transport de calor i fum. Es resol seguint un algorisme d'anàlisi numèric que aplica una metodologia predictor-corrector amb una precisió de segon ordre en espai i temps. Al considerar fluxos amb números de Mach baixos, la divergència del flux adopta un paper molt important en el model i permet la combinació de les equacions de conservació de la massa i l'energia. La divergència s'obté a partir de l'equació modificada d'estat i substituint els termes a l'equació de conservació de la massa i l'energia. La divergència afecta al càlcul de la taxa de calor alliberada, de la pèrdua de calor per evaporar la humitat del combustible, del flux net de calor per radiació i del flux màssic de les espècies gasoses [7].

Tal com s'ha senyalat a l'inici de l'apartat, WFDS és un simulador que aplica la dinàmica de fluids computacional – CFD. Un aspecte molt important dels models CFD és determinar com es tracta la turbulència. WFDS conté tant la tècnica *Large Eddy Simulation* – LES – com *Direct Numerical Simulation* – DNS. Generalment, per defecte, s'aplica el model d'Smagorinsky de LES [7]. LES és una tècnica utilitzada en la modelització de processos dissipatius – viscositat, conductivitat tèrmica, coeficient de difusió del material – que transcorren a grans escales, comparades amb la mida de la malla. A priori, com més fina és la malla, millor és la resolució de les escales de turbulència i menys importants són les suposicions i simplificacions relacionades amb els fenòmens dissipatius (veure l'apartat 4.2). Les variables de les equacions de conservació es tracten per adaptar-les al model de turbulència.

La temperatura local s'obté mitjançant la llei d'estat dels gasos ideals. La dissipació d'energia cinètica es modelitza aplicant el coeficient constant del model d'Smagorinsky. El transport turbulent de calor i massa es formula considerant constants els nombres de Prandtl i Schmidt, respectivament. La concentració d'espècies i les temperatures dels elements que són més petits que la cel·la – com ara les partícules de combustible – es tracten conjuntament amb els models de combustió, transferència de calor i de radiació tèrmica [6].

Tal com s'ha dit en apartats anteriors, aquest projecte es centra principalment en l'estudi del model hidrodinàmic i, més concretament, en l'anàlisi de la força d'arrossegament que apareix a l'equació de conservació del moment de Navier-Stokes.

Model del combustible sòlid

La massa forestal no és un bloc sòlid robust, és a dir, s'hi poden distingir diferents elements: virosta, fulles, branques, troncs, etc. Per aquest motiu, és adequat considerar-ho, en modelització física, com un conjunt de partícules envoltades d'aire. Les partícules de combustible es configuren generalment com a elements de mida inferior a la mida de la cel·la i amb geometries diverses. El model del combustible sòlid en WFDS presenta una sèrie d'assumpcions que permeten tenir en compte els elements més petits que la cel·la tot i el fet de no considerar pertorbacions a petita escala amb el model de turbulència LES implementat. La solució adoptada per WFDS és, doncs, la de representar cel·les bifàsiques.

El combustible es defineix com a petites partícules idèntiques i caracteritzades per les seves propietats tèrmiques i geomètriques que es troben distribuïdes en capes i de forma homogènia dins la cel·la. Les partícules de combustible es consideren tèrmicament primes i cossos negres. Aquestes partícules interactuen en la mateixa cel·la amb l'aire que les envolta i es conceben com a fonts de massa, energia, arrossegament i emissió i absorció radiativa [6].

La definició dels elements de combustible implica un conjunt d'assumpcions. S'accepta que la pèrdua de massa d'una partícula específica és independent de la posició dins del conjunt de partícules. No es considera la difusió d'espècies a l'interior de la partícula. A més, s'assumeix que les partícules presents en una cel·la tenen les mateixes característiques termo-físiques i experimenten la mateixa evolució [6].

Model de descomposició tèrmica del combustible i combustió

El model de combustió permet modelitzar la reacció química de combustió. La reacció modelitzada és la reacció de combustió dels volàtils generats a la piròlisi del combustible que es barregen amb l'aire en proporcions estequiomètriques, sense considerar reaccions secundàries o la formació de productes com els NO_x – el N_2 s'assumeix que és químicament inactiu. El flux màssic de combustible s'obté mitjançant el model de *Eddy Dissipation Concept* de Magnussen [6]. En aquest model se suposa que l'escala de temps dedicada a la reacció química en sí és bastant més reduïda que el procés de barreja dels gasos de piròlisi i l'aire [9]. La calor de combustió s'utilitza en el model de combustió per obtenir la calor dissipada.

La descomposició tèrmica del combustible es divideix en dues etapes: l'evaporació de la humitat del combustible i la piròlisi. El mecanisme d'evaporació s'activa quan el sòlid arriba als 100°C i es manté constant fins a eliminar tot el contingut d'aigua del combustible. Una vegada s'ha evaporat tota l'aigua, la temperatura continua augmentant fins a arribar a 127°C quan s'inicia el procés de piròlisi. La calor d'evaporació de l'aigua ve predeterminada al model, així com la calor de piròlisi. El model de degradació tèrmica del combustible sòlid incorpora l'expressió de pèrdua de massa dependent de la temperatura de Morvan i Dupuy [10]. L'oxidació carbonosa no és modelitzada. Per això, els fenòmens de combustió incandescent no es poden representar.

Model del transport de la radiació tèrmica

Els combustibles forestals emeten molt sutge. Per això, és raonable assumir que es comporten com a cossos grisos. El combustible s'assumeix que es compon d'elements més petits que la cel·la i que són perfectes absorbidors i no dispersadors de radiació. A més, estan uniformement distribuïts i fixes en el volum d'una cel·la.

El model de transport de la radiació tèrmica resol l'equació del transport de la radiació (RTE) integrada per tots els angles sòlids. El coeficient d'absorció s'obté considerant que les partícules són esfèriques. A més, el model no inclou cap model de formació del sutge i, per tant, la fracció de sutge és un paràmetre especificat per l'usuari. La RTE es resol utilitzant una tècnica similar al mètode de volums finits – FVM. La resolució d'aquesta equació requereix aproximadament el 20% del temps total de CPU [6].

Geometria

Tant FDS com WFDS permeten crear un o més d'un mallat rectangular. Els volums o obstruccions que conformen la geometria han de tenir estrictament forma rectangular i han de coincidir amb un número enter de cel·les.

A l'hora d'escollir la mida de la cel·la (x_c) és important tenir en compte que es verifiqui l'escala d'extinció (δ_R) (Equació 1) que es calcula com 4 vegades l'invers del producte entre el coeficient d'empaquetament (β) i la relació superfície-volum (σ).

$$x_c \leq \delta_R = \frac{4}{\beta\sigma}$$

Equació 1

3.3 ESTUDIS PREVIS

WFDS és un simulador força utilitzat en l'àmbit de la simulació d'incendis forestals. Pel fet de ser un simulador de tipus físic, són nombrosos els estudis de validació que es poden trobar a la bibliografia: des de la validació a petita escala, on es reproduïxen experiments a escala de laboratori (e.g. [11], [12]) o l'anàlisi de la idoneïtat del simulador a l'hora de cremar arbres i arbusts (e.g. [6], [13], [14]); fins a gran escala, on es cremen prats (e.g. [9]) o s'estudien fenòmens d'interacció de fronts (e.g. [15], [16]). A Mell et al. [17] es presenta un breu resum dels diferents estudis de validació realitzats amb WFDS. Tots els estudis citats es centren en comparar les velocitats de propagació obtingudes en els experiments amb les obtingudes en la simulació. Mitjançant aquesta comparativa i tenint en compte el cost computacional que requereixen es valora positivament la idoneïtat del simulador.

En els estudis citats prèviament s'avalua el model de WFDS com un tot, sense prestar especial atenció a cap fenomen en concret. En la majoria dels estudis ni tant sols es dona el valor dels diferents paràmetres d'entrada necessaris per definir l'escenari. Val a dir que alguns d'aquests paràmetres generen controvèrsia a nivell d'usuari ja que o bé el nom que els defineix no és suficientment acurat, o són paràmetres que no es poden determinar experimentalment, o no se'n coneix amb precisió la naturalesa o implicació al model matemàtic.

A Overholt et al. [12] es realitza un estudi de sensibilitat sobre la velocitat de propagació de la càrrega, la humitat i la relació superfície-volum del combustible per a experiments a gran escala amb un herbaci que creix en mates típic de les regions de Texas (*Schizachyrum scoparium*) per a un escenari amb vent i conclou que la humitat és un paràmetre sensible.

Un estudi de sensibilitat més complet es presenta a Tarragó et al. [18] on s'estudia la influència de la mida del domini, la mida de la cel·la i d'un total d'onze paràmetres utilitzats per definir el combustible; entre ells la densitat aparent, la densitat, la humitat, la calor de combustió i la relació superfície-volum del combustible i la temperatura ambiental – que són paràmetres determinats experimentalment – i la fracció carbonitzada, la fracció de sutge, la constant d'arrossegament, la velocitat màxima de crema i la velocitat màxima de deshidratació que són paràmetres obtinguts de la bibliografia. A l'estudi es compara la velocitat de propagació experimental i simulada d'uns experiments realitzats a escala de laboratori amb palla d'ordi (*Hordeum vulgare*.) Pels paral·lelismes – el combustible utilitzat és de la mateixa espècie, la instal·lació utilitzada és la mateixa i la metodologia experimental és també molt similar – entre els experiments analitzats en Tarragó et al. [18] i aquest projecte, val la pena remarcar les conclusions presentades. L'estudi mostra total insensibilitat a la mida del domini i determina una mida de cel·la cúbica òptima de 0,02 m. L'estudi de sensibilitat paramètric conclou que la densitat aparent i la calor de combustió són paràmetres determinats experimentalment que són molt sensibles

al model matemàtic; així com la velocitat màxima de crema, que és un paràmetre obtingut a partir de la bibliografia. L'estudi determina total insensibilitat de la constant d'arrossegament, objecte d'estudi en aquest projecte. No obstant, aquest paràmetre genera certa controvèrsia dins la comunitat científica ja que inicialment certs estudis recomanaven un valor que s'ha comprovat que era erroni [19] i la nomenclatura que el designa indueix a error.

Seguint la temàtica d'estudi d'aquest projecte, Mueller et al. [20] presenten un estudi on avaluen el model de turbulència de WFDS mitjançant uns experiments realitzats on es determina el camp de velocitats del vent al passar a través de les capçades d'un arbre. A més, a Mueller [19] es realitza un estudi més extens sobre la influència del coeficient d'arrossegament en arbres i prova la idoneïtat de LES per modelitzar la turbulència. L'estudi realitzat no considera la combustió, només la turbulència i aerodinàmica de l'aire que interacciona amb l'arbre. Mueller [19] dedueix els valors de les constants d'arrossegament segons la geometria de la partícula a simular.

4 FONAMENTS TEÒRICS DE LA FORÇA D'ARROSSEGAMENT

Tal com s'ha comentat en els apartats anteriors, aquest projecte es centra en l'estudi de la força d'arrossegament que resulta de la interacció entre les partícules de combustible i l'aire que les envolta. Aquest capítol inclou la definició teòrica de la força d'arrossegament. Seguidament es presenta el tractament de l'arrossegament al model matemàtic implementat a WFDS.

4.1 MODELITZACIÓ TEÒRICA

Aquesta secció presenta les diferents alternatives que recull la literatura per definir la força d'arrossegament mitjançant lleis físiques o correlacions empíriques. Per això, la revisió bibliogràfica s'inicia definint la força d'arrossegament per una única partícula i es tracta, seguidament, el cas amb més d'una partícula: el llit de partícules.

4.1.1 DEFINICIÓ PER UNA PARTÍCULA

La força d'arrossegament (f_D) és aquella força que s'oposa al moviment del fluid i és resultat de la interacció entre un fluid i un sòlid o entre dos fluids (Figura 4.1).

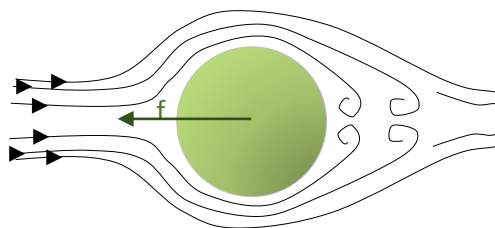


Figura 4.1. Representació de la força d'arrossegament

La força d'arrossegament depèn en gran mesura de la velocitat del fluid i es calcula mitjançant l'Equació 2.

$$f_D = \frac{1}{2} C_D A \rho u |u| \quad \text{Equació 2}$$

El coeficient d'arrossegament

El coeficient d'arrossegament (C_D) és un factor que depèn del tipus de partícula així com del règim del fluid. A Incropera i DeWitt [21] s'exposen les correlacions per partícules esfèriques (Equació 3) i partícules cilíndriques (Equació 4).

$$C_{D_{\text{esfera}}} = \begin{cases} 100 & Re < 0 \\ \left(\frac{24}{Re}\right) & 0 < Re \leq 1 \\ \frac{24(0,85 + 0,15Re^{0,687})}{Re} & 1 < Re < 1000 \\ 0,44 & Re \geq 1000 \end{cases} \quad \text{Equació 3}$$

$$C_{D_{cilindre}} = \begin{cases} \left(\frac{10}{Re^{0.8}} \right) & Re \leq 1 \\ \frac{10(0.6 + 0.4Re^{0.8})}{Re} & 1 < Re < 1000 \\ 1 & Re \geq 1000 \end{cases} \quad \text{Equació 4}$$

On,

$$Re = \frac{\rho u d_e}{\mu}$$

Cal recordar que el diàmetre equivalent (d_e) de la partícula es defineix com el diàmetre que tindria una esfera del mateix volum que la partícula real i es calcula mitjançant l'Equació 5.

$$\frac{4}{3}\pi \frac{d_e^3}{8} = \pi \left(\frac{d_p}{2} \right)^2 \ell \rightarrow d_e = \left(\frac{6V_p}{\pi} \right)^{1/3} \quad \text{Equació 5}$$

Per tal de calcular el coeficient d'arrossegament per partícules amb geometries irregulars es disposa de correlacions empíriques, com les que es mostren a la Figura 4.2, on s'obté el valor del coeficient d'arrossegament tenint en compte l'esfericitat de la partícula i el règim – tenint en compte el número de Re .

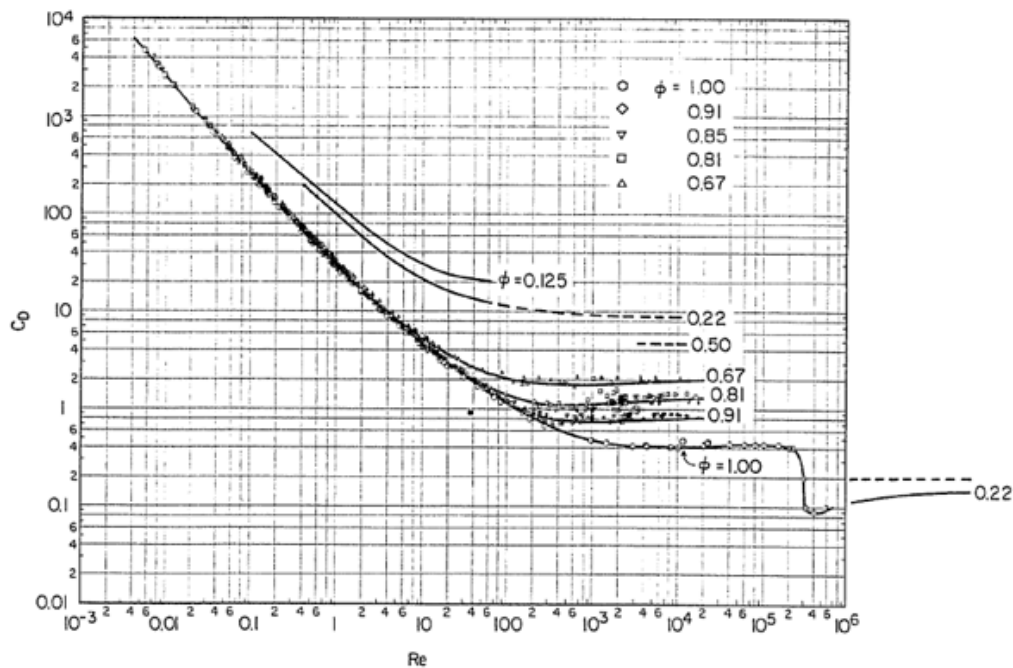


Figura 4.2. Coeficient d'arrossegament en funció del règim del fluid per una partícula d'esfericitat donada [22]

L'esfericitat (ϕ) es defineix com el quocient entre la superfície d'una esfera del mateix volum que la partícula i la superfície real de la partícula. Determinar la superfície real de la partícula resulta en moltes ocasions complicat. Una mostra de combustible vegetal, per exemple, és generalment heterogènia i cada tipus de partícula és alhora irregular i de diferents dimensions característiques. A Casal et al. [23] es presenta un mètode per determinar l'esfericitat experimentalment a partir de la

caiguda de pressió amb columnes de rebliment. Per tal d'adaptar-se al propòsit teòric d'aquest apartat, es presenta el càlcul per partícules regulars cilíndriques (Equació 6).

$$\phi = \frac{\pi d_e^2}{\pi d_p \ell} = \frac{d_e^2}{d_p \ell} \quad \text{Equació 6}$$

4.1.2 DEFINICIÓ PER LLITS DE PARTÍCULES

Si analitzem des d'una vessant geomètrica el combustible forestal, aquest es presenta en les capçades dels arbres com a un conjunt de partícules de fulles i branques de diferent mida i forma. El mateix es pot observar també en el sotabosc o en els matollars. Així doncs, la massa vegetal es presenta a la natura com a un conjunt de partícules i presenta diferent ràtio d'empaquetament, és a dir, diferent compactació. Aquesta propietat permet que les partícules sòlides interaccionin amb l'aire, que percola en el llit. La relació entre el sòlid i el fluid fonamenta l'aparició de la força d'arrossegament. A l'hora, les partícules també poden interaccionar entre elles en funció de la compactació del llit. En aquest apartat es formula la força d'arrossegament per llits pocs compactats, és a dir, sense interacció entre partícules i per llits compactats, és a dir, amb interacció entre partícules.

Sense interacció entre partícules

L'equació de la força d'arrossegament (Equació 2) s'adapta a un llit de partícules poc empaquetat. Tenint en compte que l'àrea transversal és la suma de les àrees transversals de les n partícules existents en el volum considerat ([24]–[26]) i operant de forma adient, s'obté l'Equació 7.

$$f_D = \sum_n \frac{1}{2} C_D A \rho \mathbf{u} |\mathbf{u}| = \frac{n}{2} C_D A \rho \mathbf{u} |\mathbf{u}| \quad \text{Equació 7}$$

El coeficient d'arrossegament es pot obtenir a partir de les expressions empíriques Equació 3 i Equació 4 bé tenint en compte la Figura 4.2.

Amb interacció entre partícules: llits empaquetats

Per llits empaquetats, Ergun [27] proposa una correlació empírica (Equació 8) que permet obtenir la caiguda de pressió per metre lineal de columna. Aquesta equació és àmpliament utilitzada en l'àmbit de l'enginyeria química per la caracterització de columnes de rebliment.

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2 \mu u}{\varepsilon^3 d_e^2} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon) \rho u^2}{\varepsilon^3 d_e} \quad \text{Equació 8}$$

L'equació d'Ergun consta de dos sumands. La correlació està basada en la combinació de l'equació de Kozeny-Carman per fluxos a la regió viscosa ($Re < 20$), que s'identifica amb el primer sumand que depèn en primer ordre de la velocitat del fluid; i l'equació de Burke-Plummer per fluxos a la regió turbulenta ($Re > 1000$) que correspon al segon sumand i que depèn en segon ordre de la velocitat del fluid [22].

Val a dir que els coeficients que precedeixen cada sumand – 150 i 1,75, respectivament – són característics per partícules esfèriques. El diàmetre característic és el diàmetre equivalent (d_e).

El coeficient d'arrossegament establert per Ergun s'expressa mitjançant l'Equació 9.

$$C_D = 150 \frac{1 - \varepsilon}{Re} + 1,75 \quad \text{Equació 9}$$

On,

$$Re = \frac{\rho u d_e}{\mu}$$

4.2 LA FORÇA D'ARROSSEGAMENT PER WFDS

La força d'arrossegament apareix com a sumand a l'equació de transport del moment al model implementat a WFDS. Tant aquesta com les que conformen el model de la fase gasosa de conservació de la massa, les espècies i l'entalpia són filtrades per tal de poder ésser resoltes amb un cost computacional raonable. El filtratge en el context de la tècnica *Large Eddy Simulation* – LES és una operació matemàtica que té com objectiu eliminar els remolins a petita escala de la solució de les equacions de Navier-Stokes.

LES és una de les tres tècniques principals utilitzades per resoldre la turbulència en el modelatge CFD. Tal i com ja s'ha mencionat, WFDS conté tant la tècnica LES com la *Direct Numerical Simulation* –DNS. La tècnica DNS és la més completa i complexa ja que resol totes les escales del flux. No obstant, és una metodologia molt costosa a nivell computacional. LES és una solució intermèdia que és utilitzada en la modelització de processos dissipatius que transcorren a grans escales, comparades amb la mida del mallat. El principi d'aquesta tècnica considera necessari que només es calculin els remolins grans. Els remolins petits estan amagats en el domini. La distinció entre petita i gran escala es realitza utilitzant l'operació de filtratge. El filtratge permet que el procés de modelització de la turbulència sigui menys costós a nivell computacional.

La distinció entre escala gran i petita es defineix mitjançant l'operació de filtratge espacial de tipus *low-pass*. La tipologia *low-pass* es caracteritza per acceptar les freqüències baixes i atenuar les altes. Es distingeix entre dos tipus de filtratge per derivar les equacions de Navier-Stokes: el convencional implícit ($\bar{\psi}$) i l'explícit ($\langle \psi \rangle_{V_b}$) on és un escalar arbitrari (ψ) – veure la nomenclatura. El filtratge explícit és l'utilitzat per obtenir la força d'arrossegament. El filtratge explícit permet tenir en compte la presència d'elements de combustible més petits que la cel·la [6]. Tal com s'ha explicat a l'apartat 3.2.1, el llit de combustible, on es defineix la força d'arrossegament, es representa mitjançant partícules amb

les propietats tèrmiques i morfològiques definides. Aquestes partícules, idèntiques entre sí, s'ordenen homogèniament dins la cel·la, que és, per tant, de naturalesa bifàsica – i.e. conté fases gasosa i sòlida.

Utilitzant la capsula de filtratge explícit anisotròpica [6] – veure nomenclatura –, s'obté la força d'arrossegament discreta (Equació 10). La metodologia seguida és anàloga a considerar un llit de partícules sense interacció entre elles – veure l'apartat 4.1.2.

$$\langle f'''_D \rangle_{V_b} = \frac{1}{V_b} \sum_{k \in V_b} \frac{1}{2} C_{D,k} A_k \bar{\rho}(\mathbf{u}_k - \tilde{\mathbf{u}}) |\mathbf{u}_k - \tilde{\mathbf{u}}| \quad \text{Equació 10}$$

Si es considera que cada partícula k de combustible és idèntica a la resta present a la cel·la, la força d'arrossegament es pot expressar segons l'Equació 11.

$$\langle f'''_D \rangle_{V_b} = \frac{n}{2V_b} C_D A \bar{\rho}(\mathbf{u} - \tilde{\mathbf{u}}) |\mathbf{u} - \tilde{\mathbf{u}}| \quad \text{Equació 11}$$

L'equació implementada a WFDS presenta dues consideracions addicionals. Si es defineix la relació superfície-volum (σ) del combustible com indica l'Equació 12.

$$\sigma = \frac{nA_p}{V_b \cdot \beta} \quad \text{Equació 12}$$

i tenint en compte que el coeficient d'empaquetament del llit es defineix com indica l'Equació 13,

$$\beta = \frac{\rho_{sb}}{\rho_s} = \frac{nV_p}{V_b} \quad \text{Equació 13}$$

Combinant les expressions anteriors s'obté l'Equació 14, que és l'equació final implementada al model matemàtic de WFDS.

$$\langle f'''_D \rangle_{V_b} = K \sigma \beta C_D \bar{\rho}(\mathbf{u} - \tilde{\mathbf{u}}) |\mathbf{u} - \tilde{\mathbf{u}}| \quad \text{Equació 14}$$

On K és la constant d'arrossegament que depèn de la geometria de la partícula segons l'Equació 15.

$$K = \frac{A}{2A_p} \quad \text{Equació 15}$$

El motiu pel qual WFDS realitza aquestes modificacions es deu al fet que tant el coeficient d'empaquetament (β) com la relació superfície-volum (σ) són dades proporcionades per l'usuari. A més a més, K és un paràmetre sol·licitat per definir el combustible mitjançant la comanda `VEG_DRAG_COEFFICIENT`. A diferència del que es podria pensar, la comanda no es refereix al coeficient d'arrossegament, sinó a la constant d'arrossegament. Aquesta nomenclatura fa que aquesta comanda dugui a confusions en més d'una ocasió. A Mueller [19] es presenten els diferents valors que adopta

la constant d'arrossegament segons la geometria de les partícules. Per partícules esfèriques, s'obté una constant de $1/8$ (Equació 16).

$$K = \frac{A}{2A_p} = \frac{\pi r^2}{2 \cdot 4\pi r^2} = \frac{1}{8} \quad \text{Equació 16}$$

Per partícules cilíndriques, la constant és de $1/2\pi$ (Equació 17).

$$K = \frac{A}{2A_p} = \frac{2hr}{2 \cdot 2\pi hr} = \frac{1}{2\pi} \quad \text{Equació 17}$$

Per partícules planes en forma de fulla, la constant és de $1/4$ (Equació 18).

$$K = \frac{A}{2A_p} = \frac{A}{2 \cdot 2A} = \frac{1}{4} \quad \text{Equació 18}$$

El coeficient d'arrossegament (C_D), tal com s'ha comentat anteriorment, s'obté a partir de correlacions empíriques – veure Equació 3, Equació 4 i Figura 4.2 – que varien segons la geometria de la partícula i el règim del fluid. Les correlacions implementades al model de WFDS són les corresponents a partícules esfèriques i cilíndriques. A més a més, l'usuari pot introduir-hi noves correlacions personalitzades. La comanda utilitzada per WFDS és *DRAG_LAW* que ha d'adoptar la categoria de *SPHERE*, si les partícules són esfèriques; *CYLINDER*, si són cilíndriques i *USER*, si es desitja introduir una nova geometria de partícula.

El règim del fluid es determina mitjançant el número no dimensional de Re . Aquest número es calcula segons l'Equació 19. Per tal de poder ésser calculat es requereix del diàmetre equivalent de partícula. WFDS té implementat per defecte un valor de 500 μm . No obstant, mitjançant la comanda *DIAMETER* es pot establir el diàmetre de partícula real del combustible.

$$Re = \frac{\rho |\mathbf{u} - \tilde{\mathbf{u}}| d_e}{\tilde{\mu}} \quad \text{Equació 19}$$

WFDS dona també l'opció a l'usuari de donar un valor constant als paràmetres $K \cdot C_D$ mitjançant la comanda *USER_DRAG_COEFFICIENT*. D'aquesta manera es bloqueja la dependència del coeficient d'arrossegament amb el número de Re o amb la forma de la partícula i s'assumeix un valor constant del coeficient d'arrossegament. Aquesta comanda és utilitzada a l'estudi de Mueller [19].

La principal problemàtica que genera el fenomen de l'arrossegament a WFDS recau principalment en conèixer com afecta als resultats cada una de les possibles comandes que presenta WFDS per definir la força d'arrossegament. Prèviament cal tenir clar a què es refereix cada comanda, és a dir, quines variables especifica. Actualment no es disposa d'indicacions clares sobre com definir les comandes.

Així doncs, no només no resulta trivial saber a quines variables es refereix cada comanda, sinó que tampoc es disposa de directrius concises sobre com avaluar les variables associades al fenomen de l'arrossegament als diferents escenaris que es puguin plantejar. En els propers apartats es realitza un estudi per conèixer la manera més adequada de definir la força d'arrossegament. D'aquesta manera, es pretén donar una sèrie de recomanacions per tal de poder decidir, sota un criteri científic, quina comanda és la més apropiada segons l'escenari que es plantegi.

5 DESCRIPCIÓ DE LA INSTAL·LACIÓ EXPERIMENTAL I DE LES PROVES REALITZADES

Les proves que s'utilitzen en el marc d'aquest projecte es dugueren a terme a la instal·lació del CERTEC. En aquest apartat es detallen les principals característiques de la instal·lació experimental i dels equips de mesura emprats. A més, es descriu també el disseny i la metodologia seguits en la realització de les proves. Finalment es presenten els resultats obtinguts.

5.1 DESCRIPCIÓ GENERAL DE LA INSTAL·LACIÓ EXPERIMENTAL

La instal·lació experimental constava d'una taula de combustió on es realitzen els experiments i els aparells emprats per tal de mesurar les propietats intrínseques i extrínseques del combustible, les condicions ambientals i les característiques del comportament del foc.

5.1.1 TAULA DE COMBUSTIÓ

La instal·lació experimental del CERTEC es troba ubicada al Departament d'Enginyeria Química de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, al laboratori *FlamesLab*. Es tracta d'un laboratori dissenyat per realitzar estudis experimentals relacionats amb la temàtica dels incendis forestals i industrials. A Pastor [28] es descriuen en detall els criteris de disseny de la taula de combustió, i a Pérez [29] les proves dutes a terme per a posar en marxa la instal·lació. A continuació es descriuen les dades més rellevants pel propòsit plantejat en aquest projecte.

La taula de combustió és fixa i horitzontal. La superfície de crema és una planxa d'acer plana amb una àrea útil de crema de 3,0 m x 1,60 m (4,8 m² de superfície útil de crema) i un gruix de 0,04 m. La taula està recoberta per una superfície refractària (Figura 5.1) i es trobava a 0,9 m del terra suportada per una estructura d'acer. La rodeja pel costat dret – lateral que recorre la llargada de la taula – una planxa d'acer de 0,8 m d'alt. En el costat oposat es disposa de vidres tèrmics corredissos que permeten la visualització dels assaigs. Els dos costats frontal i final romanien oberts per tal d'evitar al màxim el fenomen de *backfire*; és a dir, la inclinació cap endarrere de la flama.



Figura 5.1. Vista general de la taula de combustió

5.1.2 EQUIPS DE MESURA

Analitzador d'humitat

La humitat del combustible fou analitzada mitjançant un analitzador d'humitat electrònic de marca Sartorius model MA-45. La Taula 5.1 presenta les característiques tècniques d'aquest aparell.

Taula 5.1. Especificacions tècniques de l'analitzador d'humitat Sartorius MA-45

Analitzador d'humitat Sartorius MA-45	
Element calefactor	Radiador ceràmic de superfície
Rang de temperatura	40°C - 230°C
Precisió	Ajustable a 1°C
Capacitat de mesura	45g
Llegibilitat de l'aparell	1 mg, 0,01% d'humitat
Reproductibilitat	A partir d'1g de mostra: 0,2%
	A partir de 5g de mostra: 0,05%
Pes inicial mínim de la mostra	0,1 g
Indicació del resultat	Humitat base seca
	Humitat base humida
	Residu



El principi de funcionament d'aquest aparell es basa amb la termogravimetria infraroja. L'aparell consta d'una unitat calefactora que escalfa la mostra d'anàlisi. La mostra desprèn la humitat i l'analitzador enregistra la pèrdua de pes de la mostra.

Estació meteorològica

Prèviament a la realització de les proves es determinava la temperatura ambiental i la humitat relativa mitjançant l'estació meteorològica Kestrel 4500. A la Taula 5.2 es mostren les característiques tècniques per les variables d'interès.

Taula 5.2. Especificacions tècniques de l'estació meteorològica Kestrel 4500

Estació meteorològica Kestrel 4500		
Temperatura ambiental	Precisió	0,5°C
	Resolució	0,1°C
	Rang operacional	-10°C - 55°C
	Rang d'especificació	-28°C - 70°C
Humitat relativa	Precisió	3%
	Resolució	0,1%
	Rang operacional	0% - 100%
	Rang d'especificació	5% - 95%



Altres aparells utilitzats

Per a determinar la quantitat de combustible a col·locar a la taula de combustió es va utilitzar una balança *Mettler Toledo* model *SB32000*. Aquesta té una capacitat màxima de 32,1 kg i una precisió d'1 g. A més, per tal de determinar els instants on es trobava el front es va utilitzar un cronòmetre. Les característiques geomètriques del llit es van mesurar mitjançant una cinta mètrica de precisió 1 mm i un regle de precisió 1 mm.

5.2 DISSENY EXPERIMENTAL

L'objectiu principal dels experiments realitzats a la instal·lació del FlamesLab fou determinar les característiques principals del llit de combustible i la velocitat de propagació per tal de poder reproduir els experiments al simulador WFDS i comparar els resultats obtinguts.

En els experiments realitzats s'utilitzava també palla d'ordi – *Hordeum vulgare* – com a combustible. El combustible era caracteritzat geomètricament seguint la metodologia exposada a l'annex A. Es consideraven tres blocs experimentals on es variava la geometria del llit de combustible conservant certes lleis d'escala [30]. La Taula 5.3 mostra les característiques geomètriques del llit de combustible.

Taula 5.3. Característiques teòriques del llit de combustible de les proves realitzades

Bloc experimental	Amplada del llit de combustible, W [m]	Longitud del llit de combustible, L [m]	Alçada del llit de combustible, h [m]	Càrrega de combustible teòrica, m [kg·m ⁻²]	Densitat aparent teòrica, ρ_{sb} [kg·m ⁻³]
W25	0,25	1,40	0,02	0,328	16,4
W50	0,50	1,40	0,04	0,656	16,4
W100	1,00	1,40	0,08	1,312	16,4

Per cada escala es realitzaren 2 proves, de manera que es dugueren a terme un total de 6 proves. Les proves es realitzaren totes en el mateix dia per tal de poder considerar una humitat constant del combustible utilitzat en els tres blocs. A més, els escenaris eren senzills: sense inclinació ni vent.

5.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

La metodologia experimental que es va seguir és anàloga a la seguida a Pérez [30], però simplificada a nivell de monitorització del comportament del foc. Tot seguit es descriuen cronològicament els passos seguits per realitzar les proves.

Tasca 1. Determinació de la humitat del combustible i condicions ambientals

Prèviament a la realització de les proves es va determinar la humitat del combustible mitjançant l'analitzador d'humitat. Es van realitzar 4 rèpliques. L'analitzador d'humitat estava configurat de forma que donava la humitat en base seca. A més, es va determinar la temperatura i humitat relativa ambiental amb l'estació meteorològica.

Tasca 2. Disposició del combustible

Aquesta tasca constava del càlcul de la massa humida total de combustible necessària segons les especificacions exposades al disseny experimental (Taula 5.3) i mitjançant la balança es pesava la massa requerida pel llit de combustible per cada bloc.

El combustible es disposava tant homogèniament com era possible damunt la taula conservant les mesures d'amplada, alçada i llargada desitjades. L'amplada i llargada es mesurava utilitzant la cinta mètrica i col·locant cintes de marcatge (Figura 5.2a) al llarg del llit. Les cintes es retiraven a l'hora de realitzar la prova. L'alçada es mesurava amb una cinta mètrica o un regle en 6 punts aleatoris al llarg i ample del llit de combustible (Figura 5.2b).

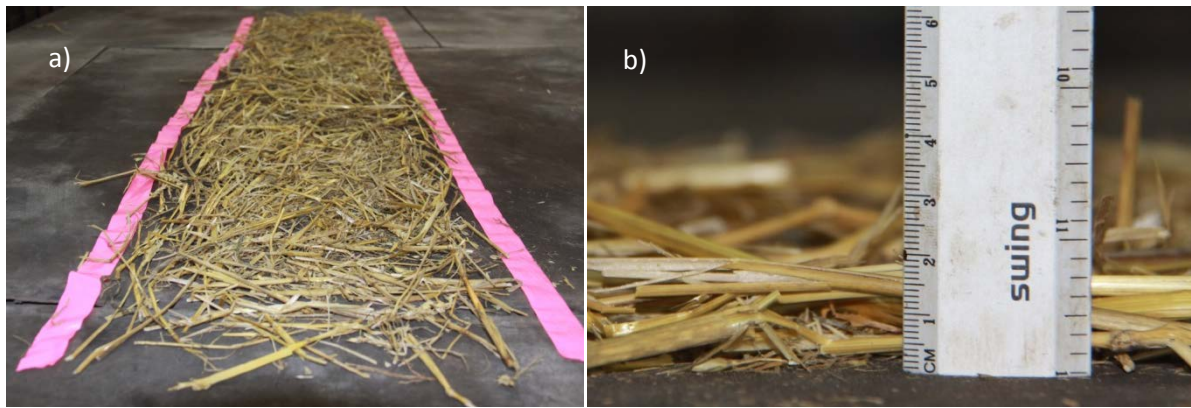


Figura 5.2. Metodologia seguida per la disposició del combustible a) per amplada i llargada b) per alçada

Tasca 3. Col·locació dels fils per determinar la velocitat de propagació

Aquesta tasca constava de la col·locació cada 10 cm de fils que recorren l'ample de la taula (Figura 5.3). Es col·locava un total de 12 fils: des de 10 cm de l'inici del llit de combustió fins a 1,20 m. Els fils es trencaven al passar el front i s'apuntaven els instants de temps en què es donava la ruptura. Aquesta metodologia de càlcul de la velocitat de propagació permet calcular les velocitats de propagació per cada interval.



Figura 5.3. Col·locació dels fils per determinar la velocitat de propagació

Tasca 4. Execució de la prova

Una vegada verificat que la instal·lació estava a punt, es procedia a la ignició. La ignició es realitzava amb un fil de llana xopat amb una mescla de gasoil i gasolina de proporció 2:1 i de llargada igual a l'amplada del llit de combustible. El fil es col·locava aproximadament a 4 cm de l'inici del llit de combustible i es procedia a la ignició amb un encenedor. En el moment de la ignició es posava en marxa el cronòmetre. En tots els experiments va ésser la mateixa persona la que dictava l'instant de ruptura del fil mentre l'altra apuntava els temps. La Figura 5.4 mostra una imatge de l'execució d'una prova.



Figura 5.4. Imatge d'una prova durant la seva execució

5.4 RESULTATS I DISCUSSIÓ

Els experiments consten de dues parts diferenciades: la caracterització de l'escenari que inclou la determinació de les propietats i geometria del llit de combustible i les condicions ambientals i el càlcul de la velocitat de propagació.

5.4.1 CARACTERITZACIÓ DE L'ESCENARI D'EXPERIMENTACIÓ

Les especificacions de les proves determinades en el disseny experimental fixaven les dimensions del llit de combustible i la densitat aparent. Tanmateix, l'alçada del llit i la densitat aparent distaren dels teòrics. A la Taula 5.4 es mostren els valors calculats a l'experimentació.

Taula 5.4. Determinació de les característiques del llit de combustible

Variable	Valor teòric	Mitjana	Desviació estàndard
W25			
Alçada del llit de combustible, h [m]	0,02	0,021	0,0036
Densitat aparent, ρ_{sb} [kg·m ⁻³]	16,4	15,5	0,0
W50			
Alçada del llit de combustible, h [m]	0,04	0,041	0,0031
Densitat aparent, ρ_{sb} [kg·m ⁻³]	16,4	16,2	0,141
W100			
Alçada del llit de combustible, h [m]	0,08	0,080	0,0020
Densitat aparent, ρ_{sb} [kg·m ⁻³]	16,4	16,3	0,127

Val a dir que la determinació de l'alçada del llit de combustible era conflictiva per la dificultat de distribuir uniformement el combustible així com de llegir les mesures correctament; és a dir, mantenint l'angle adequat amb el regle o la cinta mètrica. Cal recordar que la densitat aparent es va calcular per massa de combustible sec.

Tal com s'ha comentat anteriorment, les condicions ambientals van determinar-se a l'iniciar l'experimentació. A més, es va repetir la mesura a l'iniciar la segona sèrie d'experiments per comprovar que es mantenia la temperatura constant. El supòsit es va verificar essent que la diferència entre les dues mesures distava menys d'1°C. Anàlogament es va determinar la humitat relativa ambiental. La humitat del combustible també es va considerar constant pels tres blocs experimentals i va ésser mesurada al inici de l'experimentació. Les condicions ambientals mesurades s'exposen a la Taula 5.5.

Taula 5.5. Condicions ambientals constants pels tres blocs experimentals

Variable	Mitjana (SD)
Temperatura ambiental, T [°C]	18,4
Humitat relativa, [%]	56,8
Humitat del combustible, M [-]	0,1219 (0,00913)

L'aproximació de considerar constants les variables seleccionades per definir les condicions ambientals és raonable. La temperatura del laboratori es manté en equilibri amb l'entorn. Una vegada realitzat l'experiment es ventilava el laboratori mitjançant el sistema d'extracció de fums i mantenint les portes obertes. El temps entre proves era suficientment elevat per restablir l'equilibri tèrmic amb l'entorn. El mateix raonament és aplicable al valor de la humitat relativa. El combustible es trobava en equilibri amb l'entorn. Les proves es van realitzar durant el mateix dia i, donat que les condicions de temperatura i humitat no van canviar significativament durant el dia, és acceptable assumir que la humitat del combustible es va mantenir constant durant el dia.

5.4.2 CÀLCUL DE LA VELOCITAT DE PROPAGACIÓ

A l'apartat 5.3 s'explica la metodologia seguida per determinar la velocitat de propagació de l'incendi. Una vegada realitzada la prova es disposava de les parelles de dades posició-temps del front de flames durant l'incendi. A partir de la regressió lineal de les parelles de punts va ésser possible determinar la velocitat de propagació de cada experiment. La velocitat de propagació és el pendent de la recta que talla l'origen de coordenades. Les mesures es van determinar de forma que el primer punt posició-temps que es disposava de dades es va establir com l'origen; és a dir el temps inicial i posició inicial.

En les proves W25, el front avançava amb molta dificultat i de forma intermitent. El front no va arribar en cap cas fins al final del llit i al seu pas deixava zones no cremades. L'avançament es donava només per zones on el llit disposava d'una densitat major de combustible a causa de la dificultat de garantir l'homogeneïtat a tot el llit. Tot i comptar amb una elevada càrrega de combustible, en certs punts del llit la continuïtat de combustible no estava prou assegurada degut a la baixa càrrega de combustible.

Tenint en compte l'anterior, no es determina un valor de la velocitat de propagació pel bloc W25. Els resultats obtinguts de la velocitat de propagació pel bloc W50 es mostren a Figura 5.5a i pel bloc W100 a Figura 5.5b.

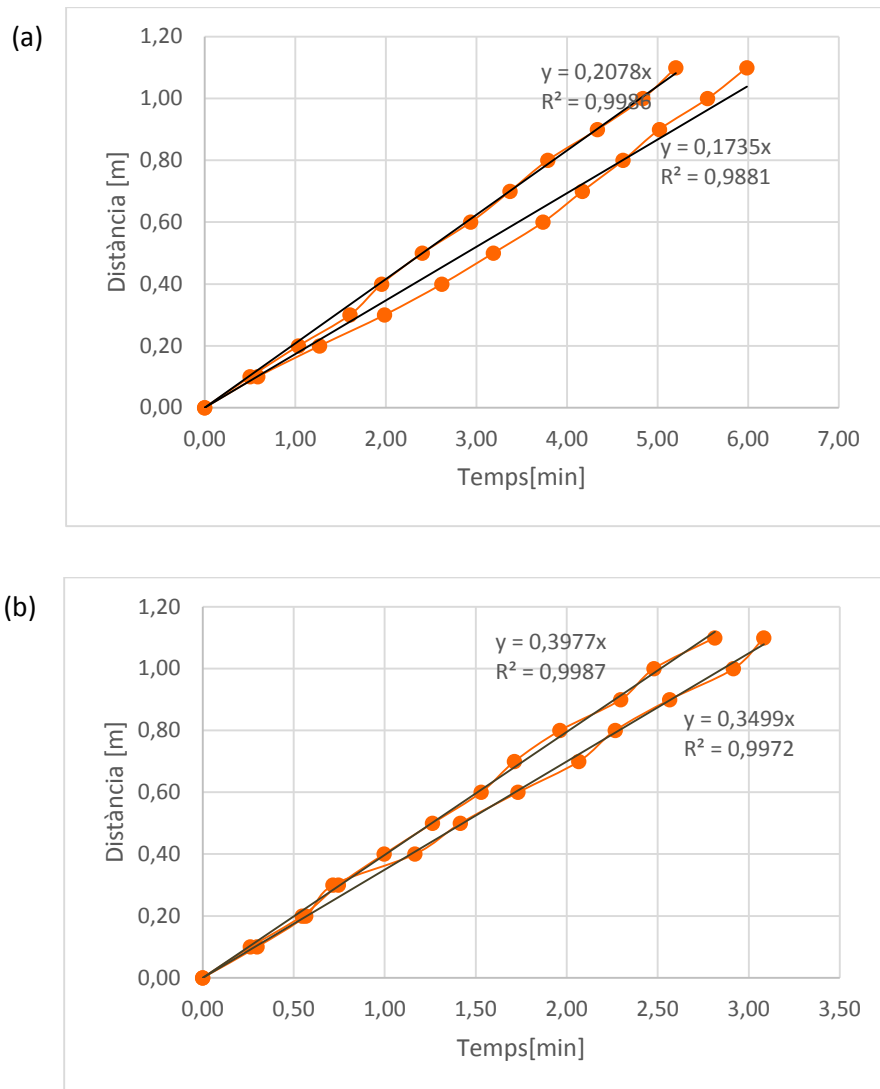


Figura 5.5. Resultat de la velocitat de propagació per les proves experimentals. (a) bloc W50; (b) bloc W100

Tal com es pot observar, els coeficients de regressió calculats són, pels dos blocs experimentals, molt propers a 1. En tots dos blocs analitzats, el front avançava sense dificultat. Nogensmenys, el bloc W100 era més intens i les flames eren més altes.

A la Taula 5.6 es mostra la velocitat de propagació mitjana obtinguda en els tres blocs experimentals.

Taula 5.6. Resultats experimentals de la velocitat de propagació

Bloc experimental	Velocitat de propagació mitjana,
	R [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$] (SD)
W50	0,191 (0,0243)
W100	0,374 (0,0338)

Tal com era d'esperar, els valors de la velocitat de propagació són més elevats a mesura que augmenta la càrrega de combustible. Els valors obtinguts són significativament menors als determinats a Pérez [30] tot i haver augmentat considerablement la càrrega de combustible. El motiu recau en el fet que el combustible utilitzat, tot i ser de la mateixa espècie, posseïa diferents característiques. Aquest fet es denota al mesurar la relació superfície-volum del combustible utilitzat i comparar-la amb la dels experiments realitzats a Pérez [30]. A més, la humitat del combustible utilitzat en els experiments que es presenten duplicava la del combustible utilitzat anteriorment. Val a dir que el combustible utilitzat en els experiments que es presenten és més homogeni que l'utilitzat anteriorment. Aquest fet fa que aquests experiments siguin més adequats pel propòsit plantejat en aquest projecte, que és reproduir els experiments amb el simulador WFDS que, tal com s'exposa a l'apartat 3.2, considera que el combustible és totalment homogeni.

6 LA SIMULACIÓ DE LA FORÇA D'ARROSSEGAMENT

El propòsit principal d'aquest projecte és explorar les opcions que WFDS dóna per representar el fenomen de l'arrossegament. En aquest apartat es simulen els experiments presentats a l'apartat 5 amb WFDS. Les simulacions es dissenyen de tal forma que s'estudien totes les opcions possibles per representar la força d'arrossegament – veure l'apartat 4.2. Finalment, es discuteixen els resultats obtinguts.

6.1 DEFINICIÓ DE L'ESCENARI DE SIMULACIÓ

En el marc de la simulació dels experiments realitzats, es plasma en la mesura del possible l'escenari real en què es van realitzar els experiments. Un exemple del codi de simulació utilitzat es troba a l'annex B.

6.1.1 CARACTERÍSTIQUES GEOMÈTRIQUES

Entorn físic de la simulació

La taula de combustió s'ubicava en la zona central del domini. La taula tenia les característiques geomètriques exposades en l'apartat 5.1.1, reproduint fidelment la geometria real. Pel que fa a la caracterització del material, s'assignava les propietats de l'acer (Taula 6.1) per a l'estructura de la taula de combustió mentre que la superfície de crema es definia com *Kaowool*, un material ceràmic aïllant (Taula 6.2).

Taula 6.1. Propietats intrínseques de l'acer [7]

Propietats intrínseques de l'acer	
Emissivitat, ϵ	0,95
Conductivitat, k [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	45,8
Densitat, ρ_m [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	7.850
Calor específic, C_p [$\text{KJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,46

Taula 6.2. Propietats intrínseques de la superfície de crema

Propietats intrínseques de la superfície de crema	
Emissivitat, ϵ	0,80
Densitat, ρ_m [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	272
Calor específic, C_p [$\text{KJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	1,1

Finalment, les superfícies que limiten el domini es consideraven obertes i sense vent, llevat de la superfície inferior considerada com a terra i que, per tant, era tancada. En la Figura 6.1 pot copsar-se una representació de l'escenari simulat mitjançant l'eina de visualització *Smokeview*.

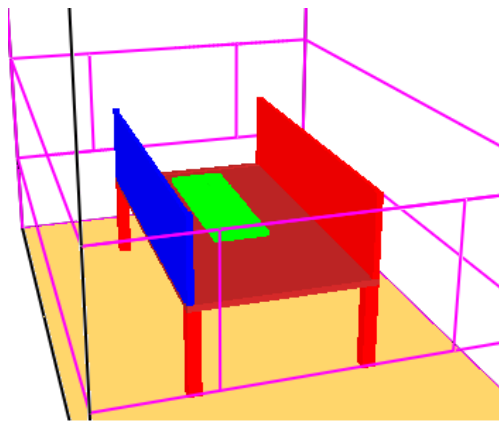


Figura 6.1. Representació de l'escenari de simulació

Definició de la malla i el domini

A l'hora de definir el domini dels tres blocs experimentals – W25, W50 i W100 – es van aplicar les conclusions extretes a l'estudi de calibratge de Tarragó [31] on es justificava que la mida del domini no causava canvis significatius de la velocitat de propagació. A més, es recomanava dividir el domini en dos mallats: un mallat fi definit a la zona de combustió pròpiament – i.e. combustible i zona amb flama – i que tenia una mida de cel·la de 0,02 m en la zona i un mallat menys fi per la resta que tenia una mida de cel·la de 0,06 m. La cel·la era cúbica. Tenint en compte els paral·lelismes – veure l'apartat 5.2 – entre els experiments realitzats i els analitzats en l'estudi de calibratge, s'assumia que els resultats obtinguts a l'estudi de calibratge previ continuaven essent vàlids en la nova configuració.

El domini s'establí de dimensions: 5,40 m x 3,60 m x 3,90 m de llargada, amplada i alçada, respectivament. Aquest domini fou escollit amb el propòsit de no ajustar el domini únicament a la geometria de la taula de combustió.

La resolució numèrica de les equacions que conformen el model matemàtic del simulador exigeixen la definició de l'escenari de la simulació en forma de petites cel·les. WFDS aproxima tots els gruixos i dimensions a un número enter de cel·les de manera que l'escenari de simulació ve determinat, en part, per la mida del mallat. Seguint les indicacions presentades a l'estudi de calibratge, el mallat era cúbic; és a dir, les cel·les tenien les tres dimensions idèntiques. A més, el domini es dividia en una zona de mallat fi amb una mida de la cel·la de 0,02 m de costat i que tenia unes dimensions de 3,00 m x 1,80 m x 1,20 m definits en llargada, amplada i alçada, respectivament. La resta es definia amb una mida de la cel·la de 0,06 m.

6.1.2 DEFINICIÓ DEL COMBUSTIBLE

L'arxiu d'entrada del simulador – veure l'annex B – exigeix altres especificacions més enllà d'aquelles relacionades íntegrament amb la geometria. Les variables d'entrada es divideixen en dos grups. Per

una banda, hi ha les variables referents a la caracterització experimental i localització del combustible. D'altra banda, hi ha una sèrie de variables difícils de determinar experimentalment. A aquestes últimes es va assignar un valor obtingut a partir de dades bibliogràfiques.

Per tal de definir completament el combustible era necessari tenir en compte tant la geometria com les propietats. El llit de combustible es definia amb una geometria rectangular amb les característiques que es presenten a la Taula 6.3.

Taula 6.3. Característiques del llit de combustible per a cada bloc experimental

Bloc	Amplada del llit de combustible, W [m]	Llargada del llit de combustible, L [m]	Altura del llit de combustible, h [m]	Densitat aparent experimental del llit, ρ_{sb} [kg·m ⁻³]
W25	0,25	1,40	0,020	15,5
W50	0,50	1,40	0,040	16,2
W100	1,00	1,40	0,080	16,3

El simulador aproxima els gruixos a un número enter de cel·les. Tenint en compte la mida del mallat fi, es va considerar el valor de l'alçada del llit de combustible teòric. La densitat aparent considerada fou la densitat aparent mitjana calculada per cada bloc experimental.

El llit de combustible es trobava centrat en la superfície de crema. Així mateix, el llit s'estenia des de 0,50 m del costat esquerre de la superfície de crema – just després de la línia d'ignició – (Figura 6.2). La palla d'ordi fou degudament analitzada i caracteritzada. A l'annex A s'exposa l'estudi realitzat i la Taula 6.4 mostra els resultats finals obtinguts. WFDS exigeix com a paràmetres d'entrada la relació superfície-volum, el diàmetre equivalent de partícula i la densitat del combustible. Val a dir que les dades extretes a l'annex A són valors aproximats que pretenen definir de forma homogènia el combustible tenint en compte les limitacions del simulador WFDS.

Taula 6.4. Caracterització de les propietats del combustible

Caracterització de les propietats del combustible	
Relació superfície-volum, σ [m ⁻¹]	3.383
Diàmetre de partícula, d_p [m]	0,0012
Longitud de partícula, ℓ [m]	0,123
Densitat del combustible, ρ_s [kg·m ⁻³]	294
Diàmetre equivalent, d_e [m]	0,0064
Esfericitat, ϕ [-]	0,28

Les condicions ambientals (Taula 6.5) es van definir constants entre els tres blocs experimentals – W25, W50 i W100. Es va assumir que la temperatura inicial del combustible era la mateixa que la

temperatura ambiental donat que s'acceptava el supòsit d'equilibri tèrmic. Cal remarcar que la humitat del combustible es defineix en base seca, segons s'indica a Mell et al. [6].

Taula 6.5. Condicions ambientals experimentals

Condicions ambientals	
Temperatura ambiental, T [°C]	18,4
Temperatura inicial de la vegetació, T _{iv} [°C]	18,4
Humitat del combustible, M [-]	0,1219

Finalment, resta per definir els paràmetres obtinguts a partir de la bibliografia. A Mell et al. [6] es dóna les indicacions per definir els paràmetres requerits per caracteritzar el combustible a WFDS i es recomanen els valors de certs paràmetres.

La fracció de sutge (χ_s) es recomana que adopti un valor de 0,02. Aquest valor es determina experimentalment en l'estudi que es presenta a Mell et al. [6] i és raonable donat que el combustible forestal emet una elevada quantitat de sutge.

La calor de combustió es defineix com el flux de calor alliberat pels volàtils per kg de massa dels gasos de piròlisi (Δh_c). Donada la dificultat d'obtenir experimentalment aquesta dada, s'utilitzen els valors proporcionats al treball de Sussot [32] on es determinen les propietats tèrmiques d'una llista d'espècies vegetals. La fracció carbonitzada s'obté també de Sussot [32]. En els experiments simulats el combustible era palla d'ordi. Aquesta espècie no apareix a la llista d'espècies analitzades i, per tant, s'aproxima la calor de combustió i la fracció carbonitzada (χ_{char}) de la palla d'ordi a la de l'espècie *Bromus tectorum* que també pertany a la família de les gramínies. El valor de la calor de combustió que presenta Sussot [32] és la calor alliberada pels volàtils per kg de combustible verge sec ($\Delta h_{volàtils}$). Per això, cal aplicar una correcció mitjançant la fracció carbonitzada (Equació 20) [6].

$$\Delta h_c = \frac{\Delta h_{volàtils}}{1 - \chi_{char}} \quad \text{Equació 20}$$

La fracció carbonitzada es defineix com el quocient entre la massa de carbó i la massa de combustible verge sec i és de 0,217. La calor de combustió corregida és de 15.632 kJ·kg⁻¹.

Els coeficients estequiomètrics de la reacció de combustió són calculats a partir de la fórmula empírica (C_xH_yO_z) que té el combustible. Per això, és necessari definir la composició del combustible. La composició de la palla d'ordi (Taula 6.6) es va extreure de l'estudi de Gaur i Reed [33].

Taula 6.6. Composició del combustible

Composició del combustible	
Mols carboni combustible, c_c [mols]	3,60
Mols oxigen combustible, c_o [mols]	2,46
Mols hidrogen combustible, c_h [mols]	4,96

La velocitat màxima de crema (R_{MC}) i la velocitat màxima de deshidratació (R_{MD}) limiten la generació de gasos inflamables del combustible i vapor d'aigua, respectivament i s'aplica, si és necessari, a les equacions de la fase sòlida per calcular el flux màssic de gasos de piròlisi i de vapor d'aigua, respectivament. Aquests paràmetres s'utilitzen per assegurar que la solució convergeix a cada interval de temps calculat. Per la seva senzillesa, els experiments estudiats presentaven una velocitat de crema constant [30]. A l'hora de simular els experiments realitzats es van utilitzar les velocitats de crema calculades a Pérez [30] (Taula 6.7). Els valors reals de la velocitat de crema que s'esperarien serien lleugerament inferiors. Per això, s'accepta l'assumpció realitzada com a correcta ja que el paràmetre es defineix com a un límit superior de la velocitat de crema. Com que no es disposava de dades experimentals de la velocitat de deshidratació, es va aplicar el valor utilitzat per Mell et al. [6] que és de $0,40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$.

Taula 6.7. Valors de la velocitat màxima de crema

Bloc	Velocitat màxima de crema,
	$R_{MC} [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}]$
W25	1,19
W50	1,09
W100	0,57

Finalment, el fenomen de l'arrossegament també es caracteritza com a variables d'entrada. No obstant, essent l'estudi d'aquest fenomen l'objectiu d'aquest projecte, es caracteritzaran les variables d'entrada relacionades amb el mateix més endavant.

Ignició

La ignició es representa en la simulació com una franja situada a 0,25 m de l'extrem esquerre de la superfície de crema, d'amplada coincident amb la del llit de combustible i llargada, 0,25m (Figura 6.2). Per tal d'assegurar que la ignició és suficient, s'aporta una potència calorífica de $400 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ que s'estima com la potència calorífica aportada experimentalment per la combustió de la gasolina en el fil d'ignició. Així mateix, la ignició comença 1,5 segons després de l'inici de la simulació i dura 35 segons.

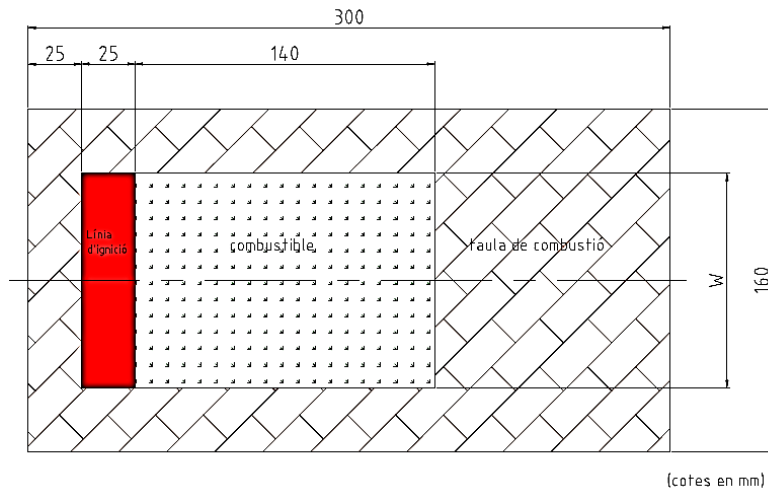


Figura 6.2. Localització del combustible i la línia d'ignició sobre la superfície de crema

6.1.3 VARIABLES DE SORTIDA

En aquest projecte es desitja comparar la velocitat de propagació (R) obtinguda experimentalment amb l'obtinguda pel simulador. Com que el simulador no proporciona directament la velocitat de propagació, es defineix un mètode indirecte basat en la detecció de pics màxims de temperatura al llarg del pas del front de foc. Per això cal ubicar en el domini de simulació una sèrie de punts dels quals se'n vol extreure l'evolució de la temperatura en el temps, emulant l'ús de sensors de temperatura (termoparells) ubicats en la zona experimental. Aquests termoparells determinen la temperatura en el punt en què es troben instal·lats en un interval fixat a 0,1 segons. Aquests valors de temperatura es llisten en un arxiu de sortida per la posterior interpretació i tractament.

Per tal d'obtenir resultats comparables entre les dues metodologies – experimentalment i mitjançant WFDS – s'instal·la una sèrie de 29 termoparells en la zona central de la superfície de crema, distanciats 0,05 m al llarg del llit de combustible – des de 0,50 m del lateral esquerre fins al final del llit – i ubicats a una altura de 0,04 m del llit de combustible. El temps de simulació s'estableix en 300 segons pels blocs W25 i W50 i 250 segons pel bloc W100. Si bé s'assumeix que segurament el front no recorrerà tota la llargada del llit, es fixa un temps aproximat per assegurar un règim estacionari i que exigeixi un temps de còmput raonable (aproximadament 36h).

Per tal d'obtenir la velocitat de propagació, s'implementa la funció *Ros.m* –veure annex C – mitjançant el programari Matlab®. Aquesta selecciona el sensor que enregistra la temperatura màxima per a cada interval de temps analitzat. Seguidament, determina la posició del termoparell seleccionat en el llit de combustible. D'aquesta manera, es generen parelles distància-temps que permeten realitzar un gràfic de tendència lineal essent el pendent la velocitat de propagació mitjana. Per això, es busca l'equació de la recta de regressió que millor s'ajusta a la tendència lineal d'aquestes parelles de punts. Convé

remarcar que només es seleccionen aquelles parelles distància-temps que presenten una temperatura igual o superior a 350°C, que és la temperatura lliandar que indica la presència de flama.

6.2 DISSENY DE LES SIMULACIONS

Per tal de determinar com afecta a la velocitat de propagació les diferents comandes que WFDS presenta per representar el fenomen de l'arrossegament, es determina el valor que ha d'adoptar cada comanda i es genera el disseny de les simulacions.

6.2.1 CÀLCUL DELS PARÀMETRES RELATIUS A L'ARROSSEGAMENT

A l'apartat 4.2 s'exposen les diferents comandes possibles per definir la força d'arrossegament (Equació 14) a WFDS.

Tal com s'exposa a l'apartat anterior, la relació superfície-volum és un paràmetre introduït per l'usuari. El coeficient d'empaquetament és un paràmetre introduït indirectament ja que es calcula a partir del quocient de la densitat aparent entre la densitat del combustible; essent ambdós paràmetres introduïts per l'usuari. La densitat i la velocitat de l'aire són paràmetres que s'obtenen de la resolució de les equacions del model matemàtic. Per tant, la força d'arrossegament pot caracteritzar-se introduint la constant d'arrossegament (K) i definint la geometria de la partícula per tal que es pugui obtenir el coeficient d'arrossegament (C_D) de la correlació adequada.

La constant d'arrossegament es va calcular analíticament a partir de l'Equació 15 i tenia un valor de 0,159. Aquest era el valor esperat tenint en compte la geometria cilíndrica de les partícules que coincidia amb el deduït a l'Equació 17 de $1/2\pi$.

El coeficient d'arrossegament es va calcular aproximadament considerant diferents geometries de partícula: esfèriques – a partir de l'Equació 3 –, cilíndriques – a partir de l'Equació 4 – i com un llit de partícules que interaccionen entre sí – a partir de l'Equació 9. Per calcular el coeficient d'arrossegament era necessari calcular el número de Re en tots els casos. Per fer-ho es van utilitzar una densitat de l'aire de $1,184 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ i una viscositat de $1,83\cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ que són les propietats de l'aire a 25°C. El diàmetre equivalent de partícula s'havia calculat ja prèviament i era de 0,0064 m (Taula 6.4). La velocitat de l'aire (Taula 6.8) es va determinar mitjançant anemòmetres en unes proves experimentals anàlogues a les presentades a l'apartat 5 – veure l'annex D. En aquestes proves es mesurava la velocitat d'entrada d'aire a la flama. L'anemòmetre es situava a 10 cm a sobre del llit de combustible.

Taula 6.8. Velocitat mitjana d'entrada d'aire a la flama

Bloc	Velocitat d'entrada d'aire a la flama, u_i [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
W25	0,13
W50	0,18
W100	0,29

A partir de les dades anteriors es calcula el número de Re i mitjançant les correlacions adients els valors del coeficient d'arrossegament (Taula 6.9). Els coeficients d'arrossegament calculats eren valors aproximats vàlids a la superfície superior del llit de combustible.

Taula 6.9. Càlcul del coeficient d'arrossegament per les diferents geometries de partícula

Bloc	Reynolds, Re [-]	Coeficient d'arrossegament, C_D [-]		
		Correlació cilíndriques	Correlació esfèriques	Correlació Ergun
W25	53,6	1,92	1,42	1,90
W50	74,2	1,77	1,21	1,86
W100	119,5	1,59	0,976	1,82

Els valors obtinguts per les tres correlacions eren semblants entre ells essent el valor obtingut amb la correlació per partícules esfèriques lleugerament inferior a la resta. A més, el fet que els valors del coeficient d'arrossegament obtinguts amb el factor de fricció de l'equació d'Ergun siguin semblants a l'obtingut a partir de les correlacions per partícules esfèriques i cilíndriques permet validar l'assumpció que realitza WFDS de definir la força d'arrossegament sense tenir en compte la interacció entre les partícules del llit de combustible. Tot i això, val a dir que la validació és només aplicable a escenaris on es disposi de graus d'empaquetament i de règims semblants ja que, com es pot intuir, a l'augmentar el número de Reynolds la diferència entre el valor obtingut per Ergun i per les correlacions de cilíndriques i esfèriques augmenta.

Tal com era d'esperar, a l'augmentar el número de Reynolds, augmenta la turbulència i el coeficient d'arrossegament disminueix ja que es tendeix al despeniment de la capa límit i, per tant, disminueix la resistència que la partícula sòlida presenta al moviment del fluid.

6.2.2 DISSENY DE LES SIMULACIONS

WFDS permet dues opcions per definir la força d'arrossegament: definir la constant d'arrossegament mitjançant la comanda `VEG_DRAG_COEFFICIENT` i la geometria de la partícula per què el propi simulador pugui calcular el coeficient d'arrossegament mitjançant `DRAG_LAW`, o bé definir el producte de la constant i el coeficient d'arrossegament mitjançant la comanda `USER_DRAG_COEFFICIENT`.

Per la primera opció es va considerar l'escenari amb el coeficient d'arrossegament calculat per WFDS a partir de la correlació per partícules esfèriques (Equació 3) i a partir de la correlació per partícules cilíndriques (Equació 4). Això es va aconseguir definint la comanda *DRAG_LAW* com '*SPHERE*' o com '*CYLINDER*'. La constant d'arrossegament es va mantenir pels dos escenaris amb el valor calculat.

Per la segona opció es van plantejar tres escenaris possibles per calcular la comanda *USER_DRAG_COEFFICIENT*: considerant el coeficient d'arrossegament per les partícules de geometria cilíndrica, de geometria esfèrica o per l'equació d'Ergun. Si bé com es mostra a l'annex A les partícules tenien geometria cilíndrica, seria coherent aproximar-les a geometria esfèrica a partir del diàmetre equivalent. Aquesta aproximació també s'assumeix en altres ocasions com en el model de transport de la radiació tèrmica – veure l'apartat 3.2.2.

Les simulacions van ser executades en ordre aleatori mitjançant un total de 8 ordinadors: 4 ordinadors de característiques Intel® Core i5 amb 4GB de RAM, un disc dur de 150 GB de capacitat i una targeta gràfica de 128 MB de RAM i 4 ordinadors de característiques Intel® Core i7 amb 4GB de RAM, un disc dur de 150 GB de capacitat i una targeta gràfica de 128 MB de RAM. Així doncs, es van executar un total de 15 simulacions amb les particularitats que mostra la Taula 6.10.

Taula 6.10. Disseny de les simulacions

Bloc	Sèrie	DRAG_LAW	VEG_DRAG_COEFFICIENT	USER_DRAG_COEFFICIENT
W25	KC	'CYLINDER'	0,159	-
	KS	'SPHERE'	0,159	-
	UDC_C	-	-	0,305
	UDC_S	-	-	0,225
	UDC_E	-	-	0,302
W50	KC	'CYLINDER'	0,159	-
	KS	'SPHERE'	0,159	-
	UDC_C	-	-	0,282
	UDC_S	-	-	0,193
	UDC_E	-	-	0,296
W100	KC	'CYLINDER'	0,159	-
	KS	'SPHERE'	0,159	-
	UDC_C	-	-	0,253
	UDC_S	-	-	0,155
	UDC_E	-	-	0,290

On “-” indica que el paràmetre no ha estat inclòs en el codi.

6.3 RESULTATS I DISCUSSIÓ

Els resultats obtinguts en l'estudi per a la definició de la força d'arrossegament es presenten a la Taula 6.11. En aquesta taula s'hi recullen els valors de la velocitat de propagació obtinguts a la simulació i l'error relatiu comès respecte el valor experimental.

La simulació dels escenaris pel bloc W25 no s'ha inclòs ja que el front simulat no propagava i, per tant, no ha estat possible calcular-ne la velocitat. Tanmateix, durant les proves experimentals, també es va observar l'extinció de l'incendi. Així doncs, és coherent que el front no propagués pels escenaris del bloc W25.

Taula 6.11. Resultats de l'estudi per la definició de la força d'arrossegament

Bloc	Sèrie	Velocitat de propagació, $R [m \cdot min^{-1}]$	Coefficient de regressió, r^2	Error relatiu, [%]
W50	KC	0,196	0,971	2,62
	KS	0,217	0,982	13,6
	UDC_C	No propaga	-	
	UDC_S	No propaga	-	
	UDC_E	No propaga	-	
W100	KC	0,237	0,879	-36,6
	KS	0,318	0,951	-14,5
	UDC_C	0,164	0,852	-56,2
	UDC_S	No propaga	-	
	UDC_E	0,177	0,852	-52,7

Tal com s'ha comentat a l'apartat 6.1.3, el temps de simulació es va establir en 300 segons pel bloc W50 i en 250 segons pel bloc W100. Pel bloc W50, a les simulacions de la sèrie UDC l'incendi s'extingia al llarg del temps de simulació. El mateix s'observava a la sèrie UDC_S del bloc W100. Per les sèries UDC_C i UDC_E del bloc W100 s'observava com la llargada del front s'anava escurçant durant els 250 segons de simulació. Aquest fet suggereix, que a un temps de simulació més llarg l'incendi probablement s'extingiria com en la resta de casos. Tanmateix, aquesta tendència no es va observar per les sèries KC ni KS.

Pels casos plantejats de la sèrie KC i KS a la Taula 6.11 s'obtenen uns coeficients de regressió acceptables, però millorables. Pel bloc W50, l'error relatiu comès respecte els resultats experimentals és menor, en valor absolut, que pel bloc W100. A les simulacions del bloc W50 es tendeix a sobreestimar el valor de la velocitat de propagació, mentre que s'observa una tendència inversa pel bloc W100.

L'error relatiu comès pel bloc W50 és acceptable si es té en compte que es compara amb un valor extret experimentalment. Així doncs, es pot afirmar que WFDS és capaç de simular l'escenari plantejat als experiments W50. A l'hora de recomanar una correlació per calcular el coeficient d'arrossegament es recomana triar la geometria cilíndrica que s'ajusta millor al valor determinat experimentalment. Aquest és el fet esperat i coherent tenint en compte que, tal com s'exposa a l'annex A, es considera que el combustible té geometria cilíndrica.

Per bloc W100, no resulta trivial escollir entre l'opció d'utilitzar el coeficient d'arrossegament obtingut mitjançant la correlació per partícules cilíndriques o per esfèriques. En ambdós casos s'obté un error relatiu força elevat, encara que és menor per la consideració de partícules esfèriques. La pèrdua d'exactitud en la determinació de la velocitat de propagació pot deure's al fet d'una pobra especificació d'algun altre paràmetre. En concret pot ser donat al fet que no s'ha determinat experimentalment la velocitat de crema i s'ha utilitzat un valor bibliogràfic pel seu valor màxim que podria no ésser del tot adequat. A l'annex E es realitza un estudi de sensibilitat del paràmetre *VEG_BURNING_RATE_MAX*, que representa la velocitat màxima de crema i que, com s'indica a l'apartat 6.1.2, s'utilitza per assegurar que la solució convergeixi a cada interval de temps calculat. L'estudi de sensibilitat conclou que la velocitat de crema és un paràmetre de sensibilitat moderada pel bloc W100, mentre que és de sensibilitat baixa pel bloc W50. Això indica que el paràmetre, que tal com s'ha comentat és un topall que s'inclou al codi per tal d'assegurar que la solució de les equacions de generació de gasos inflamables del model de fase sòlida convergeix a cada interval de temps calculat, s'utilitza en la resolució de les equacions del model i que, per tant, caldria que fos quantificat correctament. Es conclou, doncs, que aquest paràmetre podria ser el causant que es perdi exactitud en la simulació del bloc W100.

A priori es detecta que les simulacions realitzades amb la comanda *USER_DRAG_COEFFICIENT* no són exitoses. Això pot deure's al fet que es va sobreestimar les velocitats de l'aire. Per tal de comprovar-ho, es seleccionen les simulacions de la sèrie KC i s'extreu el perfil de velocitats de l'aire al llarg de la taula de combustió que el simulador calcula pels escenaris plantejats a la sèrie KC pels blocs W50 i W100. Els perfils de velocitat extrets quan el front havia recorregut 0,5 m des de la línia d'ignició pel bloc W50 es mostren a la Figura 6.3a i pel bloc W100, a la Figura 6.3b. Els perfils de velocitat representats corresponen a les alçades de 2 cm sota de la interfície aire-combustible a l'interior del llit de combustible ($z=-2$ cm), a la interfície aire-combustible ($z=0$ cm) i a 2 cm sobre la interfície aire-combustible ($z=2$ cm). La zona anterior a la posició del front correspon a la zona cremada i la part posterior a la zona no cremada. La posició del front es marca amb un rectangle vermell.

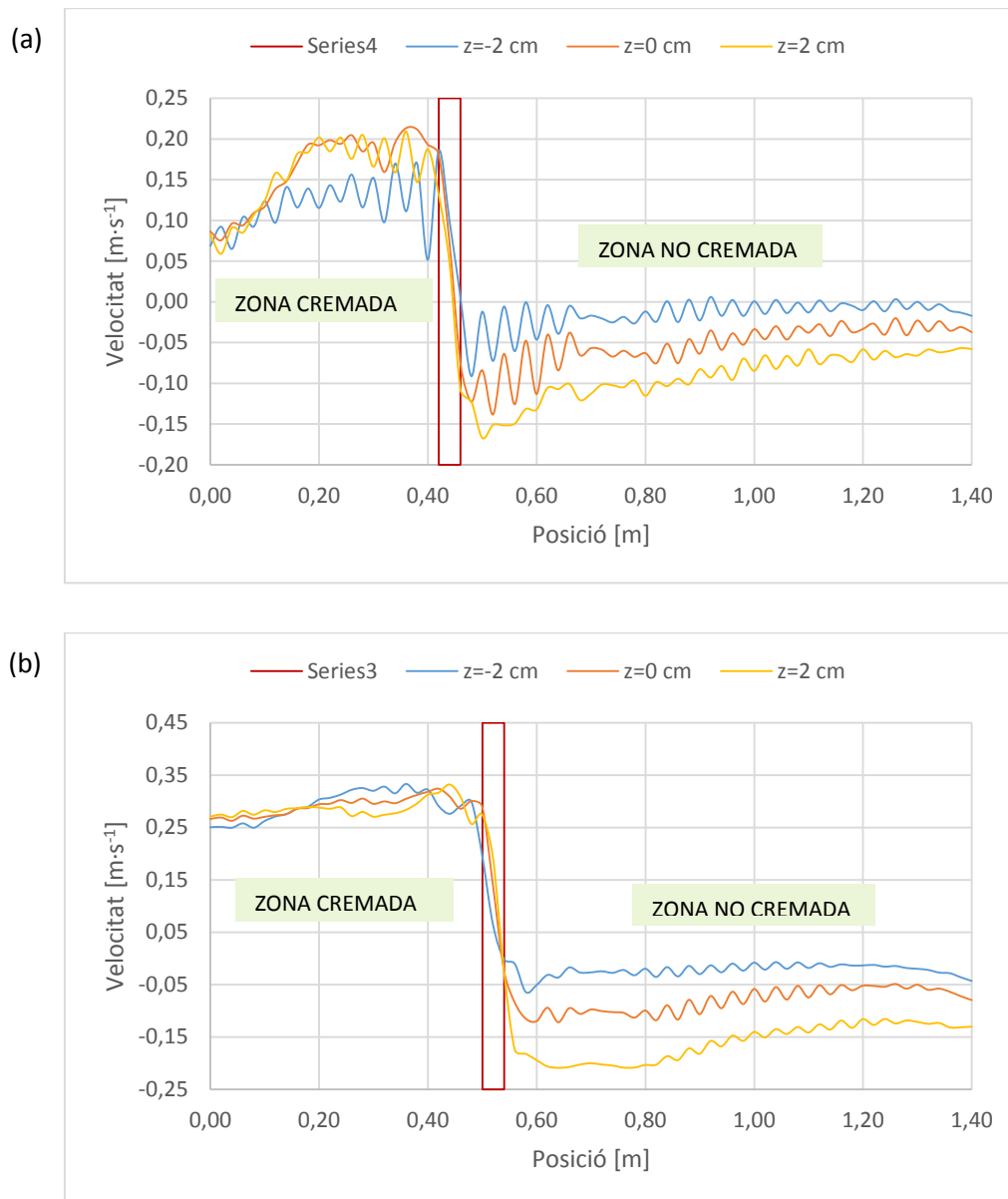


Figura 6.3. Perfils de velocitat de l'aire obtinguts amb WFDS al llarg de la taula de combustió (a) bloc W50 (b) bloc W100

La Taula 6.12 mostra la comparativa entre els resultats obtinguts amb WFDS i els experimentals de la velocitat de l'aire – veure l'annex D. La velocitat mitjana calculada amb WFDS correspon a la mitjana aritmètica dels valors de la velocitat de l'aire al llarg de la zona no cremada calculats per WFDS a l'instant estudiat – quan el front es situa a 0,50 m de la línia d'ignició – i l'alçada (z). La velocitat mitjana calculada experimentalment correspon a la mitjana aritmètica dels valors enregistrats quan el front s'apropava a l'anemòmetre. El valor màxim correspon a la velocitat màxima enregistrat, tant per les dades experimentals com per les obtingudes amb WFDS. El signe negatiu dels valors de la Taula 6.12 indica el sentit entrant a la flama de l'aire, que és arrossegat cap a l'interior de la flama.

Taula 6.12. Comparativa de la velocitat de l'aire obtinguda experimentalment i amb WFDS

Bloc	Simulat			Experimental	
	Alçada (respecte la interfície aire- combustible), z [cm]	Velocitat mitjana d'entrada, u_i [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Velocitat màxima, [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Velocitat mitjana d'entrada, u_i [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Velocitat màxima, [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
W50	-2	-0,02	0,19	-0,18	-0,25
	0	-0,05	0,21		
	2	-0,09	0,21		
W100	-2	-0,03	0,33	-0,29	-0,57
	0	-0,08	0,32		
	2	-0,15	0,33		

Dels perfils de velocitat anteriors cal destacar que els valors de la velocitat en les zones on el combustible ja ha cremat són propers als valors mitjans obtinguts experimentalment $-0,18$ i $0,29 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivament. Els valors mitjans experimentals coincideixen amb els valors màxims de la velocitat de l'aire obtinguts amb WFDS, en valor absolut. Val a dir que WFDS elimina el combustible cremat i, per tant, a la zona cremada no s'observa cap tipus de variació de la velocitat de l'aire en les alçades estudiades ja que no hi ha cap tipus d'interacció amb el combustible, que ha estat eliminat. Per això, la velocitat de l'aire màxima coincideix per les tres alçades estudiades.

En les dades obtingudes amb WFDS, la velocitat de l'aire tendeix a augmentar a mesura que l'alçada augmenta. Aquest fet és coherent tenint en compte la interacció de l'aire amb la fase sòlida. L'anemòmetre estava situat a 10 cm de la interfície aire-combustible durant els experiments – veure l'annex D – i enregistrava la velocitat de l'aire per cada segon. El fet que la velocitat mitjana enregistrada per l'anemòmetre sigui del mateix ordre de magnitud que la velocitat màxima calculada per WFDS i que correspon a la zona on no hi ha combustible perquè ja ha cremat indica que l'anemòmetre no captava la interacció entre l'aire i el combustible i, per tant, es dedueix que a 10 cm la influència de la presència del llit de combustible és menyspreable.

La velocitat de l'aire canvia de signe per la influència de la flama, que aspira aire cap a l'interior, i adopta valors inferiors, en valor absolut, en les posicions situades davant del front de flames, és a dir, a la zona no cremada. Val a dir que el valor de la velocitat decreix a posicions més allunyades del front on s'arriba a perdre la influència de la presència de la flama.

A partir d'això es pot concloure que la velocitat de l'aire varia significativament al llarg de la taula de combustió en funció de la proximitat del front de l'incendi. Tal i com s'ha exposat en el capítol teòric, el coeficient d'arrossegament és una variable que depèn de manera significativa de la velocitat de l'aire. Per tant, el fet de considerar un valor únic i constant del coeficient d'arrossegament pot conduir a error. Així mateix, la velocitat mitjana de l'aire calculada experimentalment s'ha sobreestimat, tal

com s'intuïa. El coeficient d'arrossegament seria major si es tinguessin en compte els valors de la velocitat de l'aire mitjana obtinguts amb WFDS ja que aquest coeficient decreix a l'augmentar el número de Re – veure la Figura 4.2. En aquest aspecte, es conclou que la metodologia seguida per determinar experimentalment la velocitat de l'aire no és adequada.

7 ESTUDI DE SOSTENIBILITAT DEL PROJECTE

En base a les directius exposades al *Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de Enero*, pel qual es presenta el *Texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos*, es realitza l'estudi de sostenibilitat d'aquest projecte.

7.1 DESCRIPCIÓ GENERAL DEL PROJECTE

La realització d'aquest projecte consisteix bàsicament en l'estudi de la representació de la força d'arrossegament al simulador WFDS. Així, l'estudi de sostenibilitat d'aquest projecte ve condicionat de manera exclusiva per la realització d'aquesta tasca.

7.2 ESTUDI D'ALTERNATIVES

En tractar-se d'un projecte eminentment teòric, es considera que no hi ha solucions alternatives a la seva realització.

7.3 DESCRIPCIÓ DEL MEDI

Aquest projecte s'ha dut a terme íntegrament a les instal·lacions del CERTEC, ubicat al Departament d'enginyeria química de l'ETSEIB, i ha tingut una durada d'uns 6 mesos. Es considera que la seva realització no ha modificat de manera substancial els nivells de qualitat del medi ambient immediat ni dels elements que conformen, incloent-hi el context socioeconòmic.

7.4 IDENTIFICACIÓ I VALORACIÓ DELS IMPACTES SOBRE EL MEDI

En aquest apartat, s'analitzen els diferents impactes potencials que el projecte podria tenir sobre el medi ambient i que poden ser a causa de:

- l'existència del projecte
- la utilització dels recursos naturals
- l'emissió de contaminants (a l'atmosfera, a la hidrosfera i a la litosfera), la formació de substàncies nocives o el tractament de residus.

7.4.1 CRITERIS D'AVALUACIÓ

En primer lloc es presenten un seguit de definicions tècniques imprescindibles per a la valoració dels impactes ambientals considerats significatius. Aquests termes es refereixen als diferents tipus d'efectes que poden donar lloc els impactes derivats d'un projecte i són:

En funció del tipus d'efecte:

- *Efecte positiu*: Aquell que és admès com a tal, tant per la comunitat científica com per la població en general, en el context d'una anàlisi completa dels costos i beneficis genèrics i de les eventualitats externes de l'actuació contemplada.
- *Efecte negatiu*: Aquell que es tradueix en la pèrdua de valor natural, estètic-cultural paisatgístic, de productivitat ecològica; o en un augment dels perjudicis derivats de la contaminació de l'erosió i altres riscos ambientals en discordança amb l'estructura ecològica-geogràfica, el caràcter i la personalitat d'una localitat determinada.

En funció de la incidència de l'efecte:

- *Efecte directe*: Aquell que té una incidència immediata en algun aspecte mediambiental.
- *Efecte indirecte o secundari*: Aquell que suposa una incidència immediata respecte a la interdependència o, en general, respecte a la relació d'un sector ambiental amb un altre.

A continuació, s'indiquen les diferents definicions sobre la magnitud de la valoració d'un impacte ambiental potencial que fa referència al seu caràcter de compatibilitat ambiental:

- *IA Compatible*: Aquell en el qual la recuperació és immediata en finalitzar l'activitat i no requereix de mesures protectores.
- *IA Moderat*: Aquell en el qual la recuperació no precisa de mesures protectores o correctores intensives, però que per recuperar les condicions inicials requereix un cert temps.
- *IA Sever*: Aquell en el qual la recuperació de les condicions del medi exigeix l'adequació de mesures protectores o correctores, a més d'un període dilatat de temps.
- *IA Crític*: Aquell que presenta una magnitud superior al límit acceptable, produint-se una pèrdua permanent de la qualitat de les condicions ambientals, sense possibilitat de recuperació, ni tan sols amb l'adopció de mesures protectores o correctores. A part d'avaluar els impactes concrets de les diferents relacions causa-efecte, han d'ésser valorats respecte l'impacte global del projecte. La magnitud global del projecte serà positiva si la valoració global és compatible, moderada o severa, mentre que serà negativa si la valoració global és crítica.

7.4.2 IDENTIFICACIÓ D'IMPACTES. LLISTA D'ACTIVITATS

A l'hora de realitzar un estudi de sostenibilitat d'un projecte, hi ha unes fases o activitats principals d'aquest que cal considerar i són la construcció, realització i desmantellament de l'activitat. En aquest cas, però, només té sentit analitzar l'etapa de realització de l'activitat ja que no s'ha de realitzar cap construcció ni desmantellament.

Els recursos que han estat necessaris per desenvolupar aquesta activitat són el consum d'electricitat i el consum de materials fungibles propis d'oficina com paper, cartutxos d'impressora, bolígrafs, etc. A més, del combustible forestal utilitzat per realitzar les proves.

7.4.3 IMPACTES AMBIENTALS POTENCIALS

En aquest apartat s'analitzen els possibles impactes al medi ambient i a la societat que hagi pogut ocasionar la realització d'aquest projecte. Concretament, es distingeixen tres possibles tipus d'impacte:

- Impacte per l'existència del projecte
- Impacte per l'ús de recursos
- Impacte per emissions

Impacte per l'existència del projecte

Es produeix un impacte positiu per la realització del projecte. La validació de l'eina a escala de laboratori permet reduir el número d'experiments necessaris i, en conseqüència, reduir l'emissió dels contaminants derivats de la combustió. A la llarga, tot plegat aportarà un benefici social a nivell de millorar l'eficiència en l'extinció d'incendis ja que permetrà conèixer i predir millor el comportament del foc.

Impacte per l'ús de recursos

Es produeix un impacte directe per l'ús de recursos, bàsicament material d'oficina i com a conseqüència de l'ús dels equips informàtics, condicionament de l'oficina, etc. La realització de les proves també ocasiona un impacte directe per la crema de combustible vegetal. La gestió de residus es realitza segons s'exposa a la Taula 7.1 on també s'identifica cada residu generat segons la normativa exigida per l'Agència de Catalana de Residus [34].

Taula 7.1. Classificació residus generats

Codi	Residu generat	Procés en què es genera	Via de gestió
200101	Paper	Material utilitzat en impressions i anotacions	Contenidor blau de recollida selectiva
080309	Tinta impressió	Impressió document	Punt de reciclatge especialitzat
200199	Material oficina i laboratori	Material utilitzat durant l'elaboració del projecte	Contenidor groc de recollida selectiva
190101	Escòries i cendres no volants	Incineració	Deposició en contenidors de residus no especials

Impacte per emissions

Per tal de simplificar l'estudi de l'impacte per emissions es considera solament les emissions de CO₂ ja que és el contaminant majoritari.

La realització del projecte genera un impacte directe derivat de la crema del combustible forestal. Si bé és evident que la combustió de la palla genera emissions de gasos d'efecte hivernacle, segons l'Oficina Catalana del Canvi Climàtic [35], la palla és considerada biomassa neutra respecte l'emissió de CO₂. Així doncs, es considera que el CO₂ emès per la seva combustió es veu compensat per el CO₂ convertit en O₂ durant el seu cicle de vida.

Cal considerar també l'existència d'un impacte de tipus indirecte derivat del consum d'energia elèctrica que suposa l'emissió de gasos de combustió a les centrals tèrmiques. El principal contaminant després és el CO₂, responsable de l'efecte hivernacle. Així doncs, el projecte s'ha desenvolupat al llarg de 6 mesos. Al llarg de la realització del projecte s'ha disposat durant els primers 3 mesos d'un ordinador i una mitjana de 8 ordinadors corrent les simulacions en paral·lel durant els últims 3 mesos. Aquests han estat oberts tots els dies de la setmana i les 24h del dia, el temps de consum energètic és de 19.440 hores, de les quals s'aproxima que un 95% del temps els ordinadors estan en repòs i, per tant, el consum és menor. Si es considera que l'ordinador requereix una potència mitjana de 90 W quan està actiu i 5 W, en repòs; l'energia consumida al llarg del projecte és de 354 kWh.

Finalment, a partir de les dades d'emissió de CO₂ per kWh produït publicades per la *Red Eléctrica Española*, es determina que s'emet 248 g de CO₂/kWh produït [35]. Si, a caire d'aproximació, es considera que la unitat d'energia produïda és equivalent a la unitat d'energia consumida i, per tant, no hi ha pèrdues en el transport, la massa de CO₂ alliberada és de 88 kg de CO₂.

7.4.4 VALORACIÓ DELS IMPACTES

Tots els impactes derivats d'aquest estudi es poden valorar com a impactes compatibles i, per tant, l'impacte global associat al projecte també, ateses les mesures correctores previstes i que es detallen a continuació.

7.5 MESURES PREVISTES

Les mesures correctores previstes per a minimitzar els impactes ambientals se centren bàsicament en la gestió ambiental dels residus generats (paper, cartutxos de tinta d'impressora, etc.). A més a més, s'intenta minimitzar el consum de fulls de paper utilitzant documents en format electrònic i imprimint a doble cara.

8 COST DEL PROJECTE

A continuació es detalla la relació de despeses ocasionades durant la realització d'aquest projecte. Les diferents despeses es troben desglossades en dues categories: el cost dels recursos materials consumits i el cost dels recursos humans.

8.1 RECURSOS MATERIALS

Els recursos materials consumits durant la realització d'aquest projecte estan associats al treball d'oficina i a l'experimentació. Els costos deriven del consum de material d'oficina, aigua i llum. Cal destacar que tota l'activitat ha estat desenvolupada a les instal·lacions del CERTEC – Centre d'Estudis del Risc TECNològic – i que, per tant, s'ha gaudit del material informàtic que disposa aquesta institució. En conseqüència, en referència a aquest aspecte es considera l'amortització dels equips informàtics propietat del CERTEC. Pel que fa al programari emprat, es considera que el cost de les llicències del sistema operatiu – *Microsoft® Windows 7 Professional* – i de la suite ofimàtica – *Microsoft® Office 2010* – vénen inclosos dins el cost d'adquisició de l'ordinador. En canvi, pel que fa a les llicències del programari específic que s'ha fet servir – *Minitab®*, *AutoCAD®* i *Matlab® R2014a* –, el cost ha estat nul ja que s'ha gaudit de les llicència de la UPC i del CERTEC. Finalment, el simulador utilitzat per realitzar el projecte – WFDS – és un programari lliure i, per tant, no inclou cap cost d'adquisició de la llicència.

Els costos derivats de l'experimentació es deuen al combustible forestal utilitzat, el fil i el combustible utilitzat per la ignició, així com els EPIs – guants i mascaretes. A més, del cost d'aigua i llum; així com l'amortització dels equips. Tenint en compte que l'horitzó d'amortització és de 5 anys, els equips utilitzats per l'experimentació, llevat de l'anemòmetre per càlcul de la velocitat de l'aire, ja estan amortitzats.

Els costos derivats dels recursos materials emprats es presenten a la Taula 8.1.

Taula 8.1. Costos associats als recursos materials emprats

Concepte	Cost
Amortització dels equips informàtics	640,00 €
Amortització d'equips per experimentació	70,00 €
Material d'oficina	45,00 €
Material de laboratori – EPIs –	10,00 €
Combustible	30,00 €
Subministres	90,00 €
TOTAL	885,00 €

8.2 RECURSOS HUMANS

En aquest apartat de costos associats als recursos humans, es contemplen bàsicament les hores de dedicació de la persona encarregada del projecte, així com de les altres dues persones que hi han tingut una participació activa i que han realitzat, respectivament, tasques de direcció i assessorament. A més, cal incloure la participació d'un ajudant de laboratori.

Així, es considera un cost de 20€/hora per l'enginyer *júnior* que ha realitzat el projecte, dedicant-hi 40 hores per setmana durant 6 mesos. La direcció ha estat a càrrec de dues doctores enginyeres industrials, amb una dedicació de 2 hores setmanals i amb uns honoraris estimats de 60€/hora. A més, per la realització de les proves s'ha comptat amb la col·laboració d'un auxiliar de laboratori, amb una dedicació de 15 hores – que inclouen les dues tasques d'experimentació realitzades – i amb uns honoraris estimats de 15€/hora. La Taula 8.2 mostra la relació de costos associats als recursos humans.

Taula 8.2. Costos associats als recursos humans

Personal	Cost horari, [€/hora]	Hores dedicades	Cost total
Enginyer júnior (projectista)	20,00	960	19.200,00 €
Auxiliar de laboratori	15,00	15	225,00 €
Doctora enginyera industrial (directora)	60,00	48	2.880,00 €
Doctora enginyera industrial (directora)	60,00	48	2.880,00 €
TOTAL			25.185,00 €

8.3 COST TOTAL

A continuació es presenta l'import total de les despeses resultat de la realització d'aquest projecte (Taula 8.3).

Taula 8.3. Cost total associat a la realització d'aquest projecte

Concepte	Cost
Recursos materials	885,00 €
Recursos humans	25.185,00 €
SUBTOTAL	26.070,00 €
Imprevistos (10%)	2.607,00 €
TOTAL	28.677,00 €

Així, el cost total estimat de la realització del projecte és de 28.677 €.

9 PLANIFICACIÓ

Aquest projecte va durar aproximadament 6 mesos. Els 3 primers mesos es van invertir en una revisió bibliogràfica dels estudis realitzats sobre la força d'arrossegament, el tractament d'aquest fenomen per WFDS i la revisió d'altres models publicats de modelització d'incendis forestals. Una vegada fixat un objectiu, es van realitzar unes simulacions utilitzant les proves experimentals de Pérez [30] i una sèrie de proves experimentals per determinar la velocitat d'entrada de l'aire a la flama. D'aquesta manera es va detectar la necessitat de realitzar proves experimentals específiques per tal de calcular les variables necessàries i de la forma correcta per poder-les introduir al simulador. Les proves experimentals que van tenir una durada de dues setmanes incloent-hi l'anàlisi de resultats. A continuació es van programar les simulacions a realitzar i es van extreure els resultats. Finalment els últims mesos es van dedicar a l'escriptura del projecte. A la Taula 9.1 s'exposa el cronograma d'activitats seguit en la realització d'aquest projecte.

Taula 9.1. Cronograma de les activitats del projecte

Setmana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Fase 1. Revisió bibliogràfica																								
Model matemàtic WFDS																								
Modelització d'incendis forestals																								
Estudis realitzats amb WFDS																								
Alternatives a la representació de la força d'arrossegament																								
Definició dels paràmetres d'entrada a WFDS																								
Fase 2. Introducció																								
Exploració de la força d'arrossegament amb dades d'experiments d'altri																								
Experimentació per conèixer la velocitat de l'aire																								
Fase 3. Experimentació																								
Disseny experimental i execució																								
Obtenció de resultats																								
Fase 4. Fase de simulació																								
Disseny de les simulacions																								
Execució de les simulacions																								
Anàlisi de resultats																								
Fase 5. Escripció dels apartats restants																								
Entrega del treball final de màster																								

CONCLUSIONS

El treball realitzat durant el desenvolupament d'aquest projecte ha permès extreure les següents conclusions:

L'estudi bibliogràfic realitzat en aquest projecte ha posat de manifest que el simulador WFDS presenta un gran potencial, però tanmateix necessita ésser validat amb més profunditat per diferents tipologies d'escenaris d'incendis. L'estudi bibliogràfic ha permès detectar la falta d'informació en l'especificació dels diferents paràmetres necessaris per definir l'escenari de simulació.

L'estudi teòric sobre el fenomen de l'arrossegament ha permès detectar diferents alternatives per definir la força d'arrossegament a partir de la definició del coeficient d'arrossegament. S'ha estudiat el paral·lelisme entre l'equació d'Ergun, àmpliament utilitzada en l'àmbit de l'enginyeria química, i la definició físico-teòrica de la força d'arrossegament.

Els resultats d'aquest treball indiquen que la metodologia més adequada per definir la força d'arrossegament en WFDS és avaluant la constant d'arrossegament i assignant al valor del coeficient d'arrossegament una correlació experimental en funció de la geometria de la partícula. Tanmateix, no ha estat possible determinar quina correlació és més adient ja que s'ha detectat la presència d'altres paràmetres més sensibles que els que influeixen a la definició de la força d'arrossegament i que podrien emascarar els resultats.

Es rebutja l'opció de considerar com a constant el producte de la constant i el coeficient d'arrossegament ja que s'ha comprovat que la velocitat de l'aire és una variable molt canviant i difícil de mesurar experimentalment. L'avaluació poc precisa del seu valor genera errors elevats en la velocitat de propagació simulada.

Aquest projecte fa palesa la necessitat de seguir treballant en l'anàlisi dels diferents paràmetres requerits pel simulador, dels quals no es coneix ni què representen ni la seva implicació al model matemàtic. A més, aquest projecte posa de manifest la necessitat de seguir validant el simulador WFDS per diferents tipus d'escenaris i diferents característiques de combustible per arribar a l'objectiu final que és la utilització del simulador com a eina predictiva per casos reals.

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- [1] O. Séro-Guillaume, S. Ramezani, J. Margerit, and D. Calogine, "On large scale forest fires propagation models," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 47, no. 6, pp. 680–694, Jun. 2008.
- [2] M. Finney, *FARSITE, Fire Area Simulator--model development and evaluation*, RMRS-RP-4th ed. Rocky Mountain Research Station, EUA: USDA Forest Service, 2004, p. 52.
- [3] P. Andrews, C. Bevins, and R. Seli, *BehavePlus Fire Modeling System: Version 2.0: User's Guide*, INT-194th ed. USDA Forest Service, 2003, p. 130.
- [4] A. L. Sullivan, "A review of wildland fire spread modelling 1:Physical and quasi-physical models," *Int. J. Wildl. Fire*, vol. 18, pp. 349–368, 2009.
- [5] R. R. Linn, "Numerical simulations of grass fires using a coupled atmosphere–fire model: Basic fire behavior and dependence on wind speed," *J. Geophys. Res.*, vol. 110, no. D13, p. D13107, 2005.
- [6] W. Mell, A. Maranghides, R. McDermott, and S. L. Manzello, "Numerical simulation and experiments of burning douglas fir trees," *Combust. Flame*, vol. 156, no. 10, pp. 2023–2041, Oct. 2009.
- [7] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum, R. Rehm, W. Mell, and R. McDermott, "Fire dynamics simulator (version 5), technical reference guide. Volum1: Mathematical Model," National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, EUA, Special publication 1018-5, 2004.
- [8] G. P. Forney, *Smokeview (Version 5) A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume I : User's Guide*, 1017th–1st ed. Gaithersburg, EUA: National Institute of Standards and Technology, 2010, p. 162.
- [9] W. Mell, M. A. Jenkins, J. Gould, and P. Cheney, "A physics-based approach to modelling grassland fires," *Int. J. Wildl. Fire*, vol. 16, no. 1, p. 1, 2007.
- [10] D. Morvan and J. Dupuy, "Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation," *Combust. Flame*, vol. 138, pp. 199–210, 2004.
- [11] D. Menage, K. Chetehouna, and W. Mell, "Numerical simulations of fire spread in a Pinus pinaster needles fuel bed," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 395, p. 012011, Nov. 2012.
- [12] K. J. Overholt, J. Cabrera, a. Kurzawski, M. Koopersmith, and O. a. Ezekoye, "Characterization of Fuel Properties and Fire Spread Rates for Little Bluestem Grass," *Fire Technol.*, vol. 50, no. 1, pp. 9–38, Jun. 2012.
- [13] W. Mell, J. J. Charney, M. A. Jenkins, P. Cheney, and J. Gould, "Numerical simulations of grassland fire behavior from the LANL - FIRETEC and NIST - WFDS models," in *ForEastFIRE Conference*, 2005, p. 10.

- [14] R. A. Parsons, W. E. Mell, and P. McCauley, "Linking 3D spatial models of fuels and fire: Effects of spatial heterogeneity on fire behavior," *Ecol. Modell.*, vol. 222, no. 3, pp. 679–691, Feb. 2011.
- [15] D. Morvan, C. Hoffman, F. Rego, and W. Mell, "Numerical simulation of the interaction between two fire fronts in grassland and shrubland," *Fire Saf. J.*, vol. 46, no. 8, pp. 469–479, Nov. 2011.
- [16] D. Morvan, S. Meradji, and W. Mell, "Interaction between head fire and backfire in grasslands," *Fire Saf. J.*, vol. 58, pp. 195–203, May 2013.
- [17] F. Behavior and F. Conference, "Wildland fire behavior modeling: perspectives, new approaches and applications William E. Mell," pp. 1–17, 2010.
- [18] D. Tarragó, E. Planas, O. Rios, and E. Pastor, "Study of the predictive capacity of WFDS in laboratory-scale forest fires," in *VII International Conference on Forest Fire Research*, 2014.
- [19] E. Mueller, "LES modeling of flow through Vegetation with applications to wildland fires," Worcester Polytechnic Institute, 2012.
- [20] E. Mueller, W. Mell, and A. Simeoni, "Large eddy simulation of forest canopy flow for wildland fire modeling," vol. 1544, pp. 1534–1544, 2014.
- [21] F. Incropera and D. DeWitt, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 6th Ed. New Jersey, EUA: Wiley, 2007.
- [22] O. Levenspiel, *Engineering Flow and Heat Exchange*, 1st ed. New York, EUA: Plenum Press, 1984, p. 366.
- [23] J. Casal, A. Lucas, and J. Arnaldos, "A New Method for the Determination of Shape Factor and Particle Density," *Chem. Eng. J.*, vol. 30, pp. 155–158, 1985.
- [24] M. Larini, F. Giroud, B. Porterie, and J. Loraud, "A multiphase formulation for fire propagation in heterogenous combustible media," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 41, pp. 881–897, 1998.
- [25] D. Morvan and J. Dupuy, "Modeling of fire spread through a forest fuel bed using a multiphase formulation," *Combust. Flame*, 2001.
- [26] A. Grishin, *Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them*. Tomsk, Russia: Publishing house of the Tomsk State University, 1988.
- [27] S. Ergun, "Fluid flow through packed columns," *Chem. Eng. Prog.*, vol. 48, 1952.
- [28] E. Pastor, "Contribució a l'estudi dels efectes dels retardants en l'extinció d'incendis forestals," Universitat Politècnica de Catalunya, 2004.
- [29] Y. Pérez, "Posada a punt d'un sistema per a l'estudi de l'efecte dels productes retardants a llarg termini en incendis forestals," Universitat Politècnica de Catalunya, 2003.
- [30] Y. Pérez, "Contribució a l'estudi de l'efecte del canvi d'escala en l'experimentació en incendis forestals," Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.

- [31] D. Tarragó, "Estudi de la capacitat predictiva del simulador WFDS per l'avaluació d'incendis forestals a escala de laboratori," Universitat Politècnica de Catalunya, 2013.
- [32] R. Susstot, "Characterization of the Thermal Properties of Forest Fuels by Combustible Gas Analysis," *For. Sci.*, vol. 2, pp. 404–420, 1982.
- [33] S. Gaur and T. Reed, "An Atlas of Thermal Data for Biomass and Other Fuels," Golden, USA, 1995.
- [34] Junta de Residus, "Catàleg de residus de Catalunya," 1999. [Online]. Available: <http://www.arc.cat/ca/publicacions/pdf/agencia/cataleg.pdf>. [Accessed: 26-Dec-2014].
- [35] Oficina Catalana del Canvi Climàtic, "Guia pràctica per al càlcul d'emissions de gasos amb efecte d'hivernacle (GEH)," 2014. [Online]. Available: http://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/home/reduex_emissions/guia_de_calcul_demi ssions_de_co2/140303_guia_practica_calcul_emissions_sense_canvis_ca.pdf. [Accessed: 27-Dec-2014].
- [36] H. Bartelink, "A model of dry matter partitioning in trees," *Tree Physiol.*, vol. 18, pp. 91–101, 1998.

NOMENCLATURA

Variable	Unitats	Descripció
A	m ²	Àrea transversal de la partícula de combustible
A _p	m ²	Superfície de la partícula de combustible
C _D	-	Coeficient d'arrossegament
C _p	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	Calor específic a pressió constant del material
c _i	mol	Composició molecular del combustible
d _p	m	Diàmetre de la partícula de combustible
d _e	m	Diàmetre equivalent de la partícula de combustible
f _D	N	Força d'arrossegament
f _D ^{'''}	N·m ⁻³	Força d'arrossegament per unitat de volum
G(x;Δ)	m ⁻³	Filtre Kernel d'una amplada característica Δ
h	m	Alçada del llit de combustible
k	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	Conductivitat del material
L	m	Llargada del llit de combustible
M	% en base seca	Humitat del combustible calculada com $\frac{kg\ H_2O}{kg\ comb.\ sec}$
m	kg·m ⁻²	Càrrega de combustible
n	nº partícules	Número de partícules presents en un determinat volum
R	m·min ⁻¹	Velocitat de propagació
R _{MC}	kg·m ⁻³ ·s ⁻¹	Velocitat màxima de crema del combustible
R _{MD}	kg·m ⁻³ ·s ⁻¹	Velocitat màxima de deshidratació del combustible
Re	-	Número adimensional de Reynolds
RS	-	Coeficient de sensibilitat
SD	m·min ⁻¹	Desviació estàndard de la velocitat de propagació
T	°C	Temperatura ambient
T _{iv}	°C	Temperatura inicial de la vegetació
u	m·s ⁻¹	Velocitat lineal del fluid
u	m·s ⁻¹	Vector velocitat del fluid
u _i	m·s ⁻¹	Velocitat de l'aire d'entrada a la flama
V _p	m ³	Volum de la partícula
V _b	m ³	Volum d'una cel·la
W	m	Amplada del llit de combustible

\mathbf{x}	m	Vector posició
x_c	m	Mida de la cel·la del mallat
Δh_c	$\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Calor de combustió alliberada pels volàtils per unitat de massa del gas de piròlisi
$\Delta h_{\text{volàtils}}$	$\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Calor de combustió alliberada pels volàtils per unitat de massa de combustible verge
$\frac{\Delta P}{L}$	$\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$	Caiguda de pressió per metre lineal de columna
β	-	Coeficient d'empaquetament del llit de combustible
δ_R	m	Escala d'extinció
ϵ	-	Emissivitat del material
ε	-	Fracció de buits en el llit de combustible ($\varepsilon=1-\beta$)
K	-	Constant d'arrossegament
ℓ	m	Longitud de la partícula cilíndrica
σ	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$	Relació superfície-volum del combustible
ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Densitat del fluid
ρ_m	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Densitat del material
ρ_s	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Densitat del combustible
ρ_{sb}	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Densitat aparent del llit de combustible
μ	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	viscositat dinàmica del fluid
ϕ	-	Esfericitat de la partícula de combustible
ψ		Variable escalar
χ_{char}	-	Fracció de combustible carbonitzada
χ_s	-	Fracció de combustible consumit convertit en sutge

Operador especial

$\langle \psi(\mathbf{x}, t) \rangle_{V_b} \equiv \frac{1}{V_b} \int_{x-\Delta x/2}^{x+\Delta x/2} \int_{y-\Delta y/2}^{y+\Delta y/2} \int_{z-\Delta z/2}^{z+\Delta z/2} \psi(\mathbf{x}', t) d\mathbf{x}' d\mathbf{y}' d\mathbf{z}'$	Capsa de filtre explícit anisotròpic
$\bar{\psi}(\mathbf{x}, t) \equiv \int G(\mathbf{x} - \mathbf{x}'; \Delta) \psi(\mathbf{x}', t) d\mathbf{x}'$	Filtre convencional implícit espacial
$\tilde{\psi}(\mathbf{x}, t) \equiv \overline{\rho(\mathbf{x}, t) \psi(\mathbf{x}, t)} / \overline{\rho(\mathbf{x}, t)}$	Filtre Favre implícit

A. CARACTERITZACIÓ DEL COMBUSTIBLE

El combustible utilitzat als experiments és palla d'ordi (*Hordeum vulgare*). La palla d'ordi és un combustible força heterogeni. L'objectiu final és caracteritzar la palla d'ordi obtenint el diàmetre mitjà i la llargada mitjana de la partícula, la relació superfície-volum, la densitat i l'esfericitat.

A.1.EQUIPS DE MESURA

Per caracteritzar els elements de combustible es va utilitzar un peu de rei amb precisió 0,1 mm i una balança de precisió *Mettler Toledo* model *PB153-S/FACT* amb una capacitat màxima de 151 g i mínima de 0,01 g i una precisió de 1 mg per poder determinar la densitat del combustible.

A.2.METODOLOGIA EXPERIMENTAL

La metodologia experimental que es va seguir és anàloga a la seguida a Pastor [28]. A continuació es descriuen per ordre cronològic les tasques dutes a terme.

Tasca 1. Pesatge de la mostra de combustible

Aquesta tasca constava de la recollida d'una mostra aleatòria i significativa de combustible (Figura A.1). Seguidament, es pesava la mostra amb la balança.



Figura A.1. Mostra aleatòria de combustible

Tasca 2. Identificació i separació de les diferents seccions

Aquesta tasca consistia en identificar les quatre seccions i separar-les entre elles (Figura A.2).



Figura A.2. Separació de les diferents seccions identificades

Tasca 3. Pesatge de les seccions identificades

Anàlogament a la tasca 1, es pesava cada fracció obtinguda. Seguidament es calculava la fracció massica de cada secció.

Tasca 4. Caracterització de la geometria de les diferents seccions

S'escollien un total de 10 elements aleatòriament de cada secció identificada. Els 10 elements es caracteritzaven mesurant-ne la llargada i el diàmetre interior i exterior, si tenien forma cilíndrica; la llargada i els costats, si tenien forma prismàtica. Pel boll, la fracció filamentosa i fina, es mesurava només el diàmetre. A causa de la irregularitat de la secció al llarg del fragment, es realitzaven un total de 3 mesures i s'anotava la mitjana.

Tasca 5. Mesura de la densitat del combustible

Per cada fragment caracteritzat geomètricament es determinava el pes mitjançant la balança de precisió. Coneixent el volum del fragment, es determinava la densitat del combustible. Pels fragments de secció cilíndrica buits per dins – veure l'apartat A.3 – es limitava la llargada del fragment a 5 cm.

Tasca 6. Càlcul de la relació superfície-volum del combustible i el diàmetre de partícula

A partir de les dades obtingudes, es calculava la relació superfície-volum a partir del quocient entre la superfície lateral dels fragments i el seu volum. La relació superfície-volum final es calculava ponderant-la per les fraccions massiques de cada secció calculades a la tasca 3. El diàmetre de partícula mitjà s'obtenia considerant la fórmula per partícules cilíndriques de la relació superfície-volum (Equació 21).

$$\sigma = \frac{4}{d_p}$$

Equació 21

A.3.RESULTATS I DISCUSSIÓ

La mostra de combustible es dividia en quatre tipologies: (1) cilíndrica buida, (2) boll, (3) làmines fines i (4) gra.

Fracció massica

La Taula A.1 mostra la fracció massica de cada una de les seccions. La Figura A.3 mostra les seccions separades.



Figura A.3. Separació de les quatre seccions observades

Taula A.1. Fracció màssica de les seccions obtingudes

Secció	Fracció màssica
1	0,67
2	0,10
3	0,11
4	0,12

La Taula A.1 indica que la palla d'ordi utilitzada constava majoritàriament de cilindres buits per dins. La fracció 1 es trobava en un 67% en la mostra analitzada i corresponia a les tiges de l'ordi. La resta de fraccions es trobaven en proporcions semblants. La fracció 2 és la que aporta una relació superfície-volum més elevada a la palla que permet una millor propagació del foc i s'obté de l'esmicolament de la fracció 3. La llargada de la fracció 2 era molt difícil de determinar ja que els diferents fragments es trobaven embolicats entre sí. La fracció 3 prové del despreniment de les parets de les tiges. Es caracteritzaven per ser fraccions molt primes – aproximadament de gruix igual al diàmetre del boll –, però amples. La seva amplitud podia anar des del perímetre de les tiges fins al diàmetre de boll – quan ja passaria a formar part de la fracció 2. La fracció 4 correspon al gra que no s'havia separat durant la sega. El gra es trobava, en la majoria de casos, adherit a l'extrem superior dels fragments de la fracció 1.

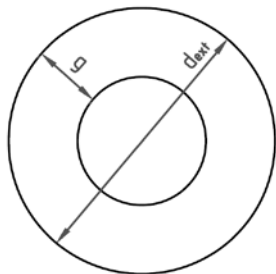
Caracterització de les seccions

Tal com s'ha exposat a l'apartat A.2, s'escollien 10 partícules de cada tipologia i es determinava les dimensions característiques per tal de poder determinar la relació superfície-volum.

Els resultats obtinguts per la fracció 1 s'exposen a la Taula A.2. La fracció 1 tenia forma de cilindre buit per dins. El gruix de la paret del cilindre era molt baix i es va considerar uniforme per totes les partícules.

Taula A.2. Resultats obtinguts per la fracció 1

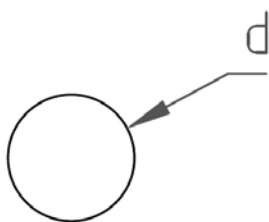
SECCIÓ 1				
	d_{ext} , [cm]	g , [cm]	ℓ , [cm]	m_p , [g]
1	0,28	0,07	13,2	0,116
2	0,33	0,07	7,6	0,108
3	0,35	0,07	10,9	0,083
4	0,21	0,07	15,1	0,032
5	0,24	0,07	17,1	0,071
6	0,19	0,07	26,2	0,043
7	0,26	0,07	18,3	0,094
8	0,29	0,07	12,4	0,083
9	0,23	0,07	10,8	0,027
10	0,32	0,07	10,9	0,103



Com ja s'ha comentat, el bol es presentava com a flocs de partícules embolicades entre sí. El bol tenia forma cilíndrica. La seva llargada es va determinar a partir de la mitjana aritmètica entre la llargada mitjana de les partícules de secció 1 i de secció 3. Aquesta suposició és raonable si es té en compte que el bol s'obté al desfilar-se les parets de les tiges. La Taula A.3 mostra els resultats obtinguts.

Taula A.3. Resultats obtinguts per la fracció 2

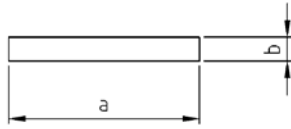
SECCIÓ 2			
	d , [cm]	ℓ , [cm]	m_p , [g]
1	0,05	11,1	0,012
2	0,07	11,1	0,005
3	0,06	11,1	0,008
4	0,07	11,1	0,009
5	0,07	11,1	0,007
6	0,03	11,1	0,004
7	0,05	11,1	0,003
8	0,05	11,1	0,008
9	0,03	11,1	0,003
10	0,03	11,1	0,002



La fracció 3 tenia forma de làmina. El gruix de les partícules de la fracció 3 es va determinar a partir de la mitjana aritmètica del diàmetre de la fracció 2. Aquesta assumpció és raonable ja que la fracció 3 acaba convertint-se, pel desgast, en elements de la fracció 2. La Taula A.4 presenta els resultats per la fracció 3.

Taula A.4. Resultats obtinguts per la fracció 3

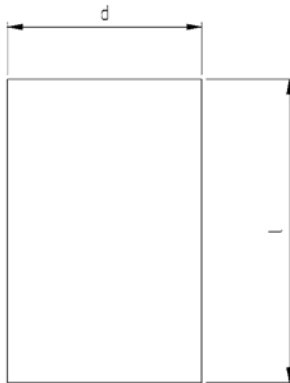
SECCIÓ 3				
	a, [cm]	b, [cm]	ℓ, [cm]	m _p , [g]
1	0,59	0,05	6,4	0,048
2	0,33	0,05	8,1	0,035
3	0,47	0,05	8,6	0,016
4	0,51	0,05	4,3	0,008
5	0,27	0,05	8,7	0,019
6	0,37	0,05	4,3	0,015
7	0,51	0,05	13,7	0,032
8	0,28	0,05	10,4	0,042
9	0,55	0,05	6,9	0,014
10	0,45	0,05	7,9	0,021



El gra tenia forma cilíndrica. Els resultats es mostren a la Taula A.5.

Taula A.5. Resultats obtinguts per la fracció 4

SECCIÓ 4			
	d, [cm]	ℓ, [cm]	m _p , [g]
1	0,75	7,7	0,200
2	0,54	6,4	0,112
3	0,24	8,6	0,122
4	0,34	4,7	0,109
5	0,43	5,5	0,078
6	0,44	6,9	0,124
7	0,55	7,2	0,119
8	0,62	6,3	0,146
9	0,38	7,7	0,109
10	0,18	6,7	0,092



A partir de les mesures realitzades, era possible mitjançant les equacions de geometria bàsiques obtenir el volum i la superfície lateral de les partícules. A partir del quocient de la superfície lateral entre el volum s'obtenia la relació superfície-volum de cada partícula de cada secció. A més, a partir del quocient de la massa entre el volum s'obtenia la densitat de cada partícula de cada secció. La Taula A.6 mostra els valors mitjans per cada secció de la relació superfície volum, la longitud de partícula i la densitat.

Taula A.6. Valors mitjans de les propietats del combustible calculades

Secció	Relació superfície-volum, σ [m ⁻¹]	Longitud de la partícula, ℓ [m]	Densitat del combustible, ρ_s [kg·m ⁻³]
1	2.857	0,143	339
2	8.781	0,111	295
3	4.417	0,079	156
4	1.060	0,068	173

Ponderant els valors exposats a la Taula A.6 per la fracció massica (Taula A.1), s'obtenia la relació superfície-volum, la longitud mitjana de la partícula i la densitat mitjana. Com que la fracció més elevada tenia geometria cilíndrica, es va assumir que la forma geomètrica més adequada per representar les partícules de combustible era el cilindre tenint en compte que el simulador només permet representar partícules cilíndriques o esfèriques. El diàmetre de partícula es calculava tenint en compte l'Equació 21. A més, a partir de l'Equació 5 es calculava el diàmetre equivalent i l'esfericitat de la partícula a partir de l'Equació 6. La Taula A.7 mostra els resultats obtinguts en la caracterització del combustible. Les dades calculades són resultats aproximats per poder considerar el combustible homogeni, tenint en compte les limitacions del simulador WFDS.

Taula A.7. Resultats obtinguts de la caracterització del combustible

Variable	Valor
Relació superfície-volum, σ [m ⁻¹]	3.383
Diàmetre de partícula, d_p [m]	0,0012
Longitud de partícula, ℓ [m]	0,123
Densitat del combustible, ρ_s [kg·m ⁻³]	294
Diàmetre equivalent, d_e [m]	0,0064
Esfericitat, ϕ [-]	0,28

B. FITXER D'ENTRADA WFDS

&HEAD CHID='W50_UDC_C', TITLE='exp. lab. W50' /

&MESH IJK= 150,90,60 XB=-1.5,1.5,-0.90,0.90,0.00,1.20 /
 &MESH IJK=20,30,20 XB= -2.7,-1.5,-0.90,0.90,0.00,1.20 /
 &MESH IJK=20,30,20 XB=1.5,2.7,-0.90,0.90,0.00,1.20 /
 &MESH IJK=90,15,20 XB=-2.7,2.7,-1.8,-0.90,0.00,1.20 /
 &MESH IJK=90,15,20 XB=-2.7,2.7,0.90,1.80,0.00,1.20 /
 &MESH IJK=90,60,15 XB=-2.7,2.7,-1.80,1.80,-0.90,0.00 /
 &MESH IJK=90,60,30 XB=-2.70,2.70,-1.80,1.80,1.20,3.00 /

&TIME T_END=300./

&MISC TMPA=18.4 /

&REAC ID='Hordeum vulgare'

SOOT_YIELD = 0.02

O = 2.46

C = 3.60

H = 4.96

HEAT_OF_COMBUSTION = 15632 /

&MATL ID = 'STEEL', EMISSIVITY = 0.95 ,DENSITY = 7850.0, CONDUCTIVITY = 45.8, SPECIFIC_HEAT = 0.46 /

&MATL ID = 'GLASS', EMISSIVITY = 0.92 ,DENSITY = 2180.0, CONDUCTIVITY = 13.8, SPECIFIC_HEAT = 0.75 /

&SURF ID='wall', COLOR='RED', MATL_ID='STEEL', BACKING='EXPOSED', THICKNESS=0.07 /

&SURF ID='wallglass', COLOR='BLUE', MATL_ID='GLASS', BACKING='EXPOSED', THICKNESS=0.06 /

&MATL ID = 'kaowool'

FYI = 'KaoWool M Temperature board'

CONDUCTIVITY_RAMP = 'kaowool'

SPECIFIC_HEAT = 1.1

DENSITY = 272.

EMISSIVITY = 0.80 /

&RAMP ID='kaowool',T= 20.,F=0.06 /

&RAMP ID='kaowool',T= 260.,F=0.06 /

&RAMP ID='kaowool',T= 538.,F=0.10 /

&RAMP ID='kaowool',T= 816.,F=0.15 /

&RAMP ID='kaowool',T=1093.,F=0.22 /

&SURF ID = 'KaoWoolsubstrate'

MATL_ID(1:1,1) = 'kaowool'

COLOR = 'FIREBRICK'

BACKING = 'EXPOSED'

THICKNESS(1:1) = 0.0127 /

&SURF ID='IGN FIRE',HRRPUA=400.,RAMP_Q='RAMPFIRE',COLOR='RED' /

&RAMP ID='RAMPFIRE',T=0.0,F=0.0 /

&RAMP ID='RAMPFIRE',T=1.0,F=0.0 /

&RAMP ID='RAMPFIRE',T=1.5,F=1.0 /

&RAMP ID='RAMPFIRE',T=36.0,F=1.0 /

&RAMP ID='RAMPFIRE',T=37.5,F=0.0 /

&OBST XB=-1.25,-1.0,-0.25,0.25,0.00,0.04,SURF_IDS='IGN FIRE','INERT','INERT' /


```

&OBST XB= -1.54,-1.25,-0.84, 0.84,0,0.04, SURF_ID = 'KaoWoolsubstrate' /
&OBST XB= -1.25, 1.54,-0.84,-0.25 ,0,0.04, SURF_ID = 'KaoWoolsubstrate' /
&OBST XB= -1.25, 1.54, 0.25, 0.84,0,0.04, SURF_ID = 'KaoWoolsubstrate' /
&OBST XB= -1.00, 1.54,-0.25, 0.25,0,0.04, SURF_ID = 'KaoWoolsubstrate'/

&OBST XB=-1.54,1.54,-0.84,-0.80,0.04,0.84,SURF_ID='wallglass' /
&OBST XB=-1.54,1.54,0.80,0.84,0.04,0.84 , SURF_ID='wall' /

&OBST XB=-1.54,-1.44,-0.84,-0.74,-0.8,0, SURF_ID='wall' /
&OBST XB=1.54,1.44,-0.84,-0.74,-0.8,0, SURF_ID='wall' /
&OBST XB=-1.54,-1.44,0.84,0.74,-0.8,0, SURF_ID='wall' /
&OBST XB=1.54,1.44,0.84,0.74,-0.8,0, SURF_ID='wall' /

&PART ID='Hordeum vulgare',
  TREE=.TRUE.,
  QUANTITIES='VEG_TEMPERATURE',
  VEG_INITIAL_TEMPERATURE=18.4,
  VEG_SV=3383.34,
  VEG_MOISTURE=0.1219,
  VEG_CHAR_FRACTION=0.217,
  VEG_DRAG_COEFFICIENT=1,
    USER_DRAG_COEFFICIENT=0.282,
    DIAMETER=6371,
  VEG_DENSITY=294,
  VEG_BULK_DENSITY=16.19,
  VEG_BURNING_RATE_MAX=1.09,
  VEG_DEHYDRATION_RATE_MAX=0.4,
  VEG_DEGRADATION = 'LINEAR',
  VEG_CHAR_OXIDATION = .FALSE.,
  VEG_REMOVE_CHARRED=.TRUE. /
&TREE XB= -1.25,0.40,-0.25,0.25,0.04,0.08 ,PART_ID='Hordeum vulgare',FUEL_GEOM='RECTANGLE' /

&VENT XB=-2.70,-2.70,-1.80,1.80,-0.9,3.00, SURF_ID='OPEN' /
&VENT XB=2.70,2.70,-1.80,1.80,-0.9,3.00, SURF_ID='OPEN' /
&VENT XB=-2.70,2.70,-1.80,-1.80,-0.9,3.00, SURF_ID='OPEN' /
&VENT XB=-2.70,2.70,1.80,1.80,-0.9,3.00, SURF_ID='OPEN' /
&VENT XB=-2.70,2.70,-1.80,1.80,3.00,3.00, SURF_ID='OPEN' /

&DUMP DT_SLCF=0.1,DT_PART=0.1,DT_BNDF=0.1,DT_BNDF=0.1,DT_PL3D=20. /
&DEVC ID='Point -1.00,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=-1.00,0,0.12/
&DEVC ID='Point -0.95,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=-0.95,0,0.12/
&DEVC ID='Point -0.90,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=-0.90,0,0.12/
&DEVC ID='Point -0.85,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=-0.85,0,0.12/
&DEVC ID='Point -0.80,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=-0.80,0,0.12/
&DEVC ID='Point -0.75,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=-0.75,0,0.12/
&DEVC ID='Point -0.70,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=-0.70,0,0.12/
&DEVC ID='Point -0.65,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=-0.65,0,0.12/
&DEVC ID='Point -0.60,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=-0.60,0,0.12/
&DEVC ID='Point -0.55,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=-0.55,0,0.12/
&DEVC ID='Point -0.50,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=-0.50,0,0.12/
&DEVC ID='Point -0.45,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=-0.45,0,0.12/

```



```

&DEVC ID='Point -0.40,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=-0.40,0,0.12/
&DEVC ID='Point -0.35,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=-0.35,0,0.12/
&DEVC ID='Point -0.30,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=-0.30,0,0.12/
&DEVC ID='Point -0.25,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=-0.25,0,0.12/
&DEVC ID='Point -0.20,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=-0.20,0,0.12/
&DEVC ID='Point -0.15,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=-0.15,0,0.12/
&DEVC ID='Point -0.10,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=-0.10,0,0.12/
&DEVC ID='Point -0.05,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=-0.05,0,0.12/
&DEVC ID='Point 0.00,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ= 0.00,0,0.12/
&DEVC ID='Point 0.05,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ= 0.05,0,0.12/
&DEVC ID='Point 0.10,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ= 0.10,0,0.12/
&DEVC ID='Point 0.15,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ= 0.15,0,0.12/
&DEVC ID='Point 0.20,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ= 0.20,0,0.12/
&DEVC ID='Point 0.25,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ= 0.25,0,0.12/
&DEVC ID='Point 0.30,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ= 0.30,0,0.12/
&DEVC ID='Point 0.35,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ= 0.35,0,0.12/
&DEVC ID='Point 0.40,0,0.16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ= 0.40,0,0.12/

```

```

&SLCF PBY= 0, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX= 2.00, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY= 0, QUANTITY='U-VELOCITY' /
&SLCF PBY= 0, QUANTITY='V-VELOCITY' /
&SLCF PBY= 0, QUANTITY='W-VELOCITY' /
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE' /

```

```

&TAIL /

```


C. ALGORITME 'Ros.m'

La funció següent ha estat desenvolupada per calcular la velocitat de propagació en $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ de l'arxiu de sortida – CHID_DECV.csv – on es troben les lectures dels termoparells situats a l'escenari de simulació.

```
function Rsqr_max = Ros;
close all
clc
Data000= csvread('d:\WDC_2\WDC_2_devc.csv ',2,1,[2,1,1002,29]);
[max,ind]=nanmax(Data000);
time = csvread('d:\WDC_2\WDC_2_devc.csv ',2,0,[2,0,1002,0]);
tTmax=time(ind);
tTmax=tTmax./60;
positionv=[-1:0.05:0.4];
Position2 = positionv';
[p,s]=polyfit(tTmax,Position2,1)
Output = polyval(p,tTmax);
Num=0; Den=0;
Mitjana=mean(Position2);
plot(tTmax,positionv)
color('red');
hold on;
y = p(1)*tTmax + p(2);
p1 = plot(tTmax,y)
set(p1,'Color','red','LineWidth',2)
xlabel('temps');
ylabel('posició');
for i=1:size(Output,1);
    Num=Num+(Output(i,:)-Mitjana)^2;
    Den=Den+(Position2(i,1)-Mitjana)^2;
end
Rsqr_max=Num/Den
```


D. DETERMINACIÓ DE LA VELOCITAT D'ENTRADA D'AIRE A LA FLAMA

Per tal de determinar la velocitat del flux d'aire que absorbeix la flama en incendis com els que es presenten a l'apartat 5 es van realitzar unes proves experimentals. A continuació es detalla les característiques experimentals, la metodologia experimental seguida i els resultats obtinguts.

D.1. DESCRIPCIÓ GENERAL DE LA INSTAL·LACIÓ EXPERIMENTAL

Les proves es van realitzar a la instal·lació del FlamesLab a la taula de combustió descrita a l'apartat 5.1.1. Tal com s'ha comentat, els experiments tenien un únic propòsit que era mesurar la velocitat d'entrada d'aire a la flama. Per aquest motiu es va utilitzar un anemòmetre Windsonic (Taula D.1).

Taula D.1. Especificacions tècniques de l'anemòmetre Windsonic

Anemòmetre Windsonic	
Element medidor	Sensor de vent ultrasònic
Material	Polycarbonat
Pes	500 g
Rang de velocitat	0 m·s ⁻¹ – 60 m·s ⁻¹
Rang de temperatura	-40°C - 80°C
Rang de direcció del vent	0° - 359°
Freqüència de mesura	0,25, 0,5, 1, 2, 4 Hz
Direcció de mesura	Biaxial
Resolució	0,01 m·s ⁻¹
Temperatura d'ús	-35°C - 70°C
Connexió	RS-232



La massa total de combustible era mesurada amb la balança *Mettler Toledo* model *SB32000* de capacitat màxima 32,1 kg i precisió d'1g i les dimensions del llit es van fixar amb una cinta mètrica.

D.2. DISSENY EXPERIMENTAL

Com l'objectiu era obtenir la velocitat d'entrada d'aire a la flama aproximada pels tres blocs experimentals caracteritzats a l'apartat 5, l'experimentació va constar d'un total de tres proves: una prova per cada bloc experimental. El combustible utilitzat fou també la palla d'ordi – *Hordeum vulgare*. En cada cas es van mantenir les característiques del llit de combustible dels experiments descrits en aquest projecte (Taula 5.3).

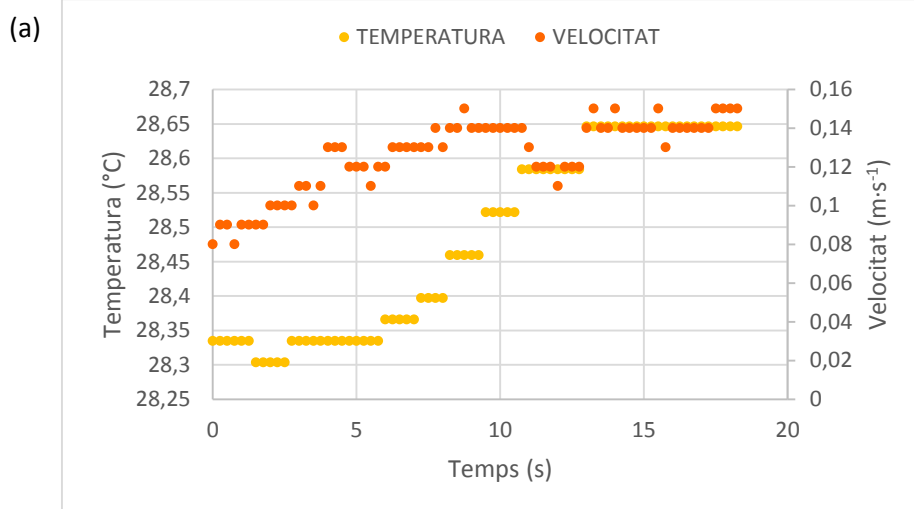
D.3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

La metodologia experimental que es va seguir és anàloga a la seguida als experiments de l'apartat 5. Les proves realitzades eren molt senzilles ja que només es volia mesurar la velocitat d'entrada d'aire a la flama.

En aquests experiments no es determinava la velocitat de propagació. Per això, no es col·locava el sistema de fils. L'anemòmetre es col·locava l'anemòmetre al centre del llit de combustible, a 1,30 m de la línia d'ignició i a 10 cm de la superfície del llit de combustible. En el moment de la ignició s'iniciava l'enregistrament de dades de velocitat i direcció de l'aire i temperatura. La freqüència d'enregistrament era de 1 Hz.

D.4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

L'anemòmetre va enregistrar a cada segon la temperatura ambiental i la velocitat i direcció de l'aire. A l'inici de l'incendi l'anemòmetre no detectava cap tipus d'alteració de la velocitat de l'aire. A mesura que el front avançava es visualitzava un augment de la temperatura i una variació de la velocitat de l'aire. La direcció de la velocitat de l'aire no es va tenir en compte i l'anàlisi de dades es va efectuar considerant el valor màxim de la velocitat. El sentit de la velocitat de l'aire era cap a l'interior de la flama. Per aquest estudi s'expressa la velocitat en valor absolut. D'aquesta manera es disposava de parelles temperatura-velocitat a cada segon. Per tal de determinar la velocitat d'entrada d'aire a la flama es va seleccionar els trams de cada prova on es detectava l'augment de temperatura. Seguidament es realitzava una anàlisi estadística del núvol de punts seleccionat i s'obtenia la velocitat mitjana. La Figura D.1a mostra la variació de la velocitat de l'aire i la temperatura ambiental per la prova anàloga a W25, la Figura D.1b, per l'anàloga a W50 i la Figura D.1c, per l'anàloga a W100.



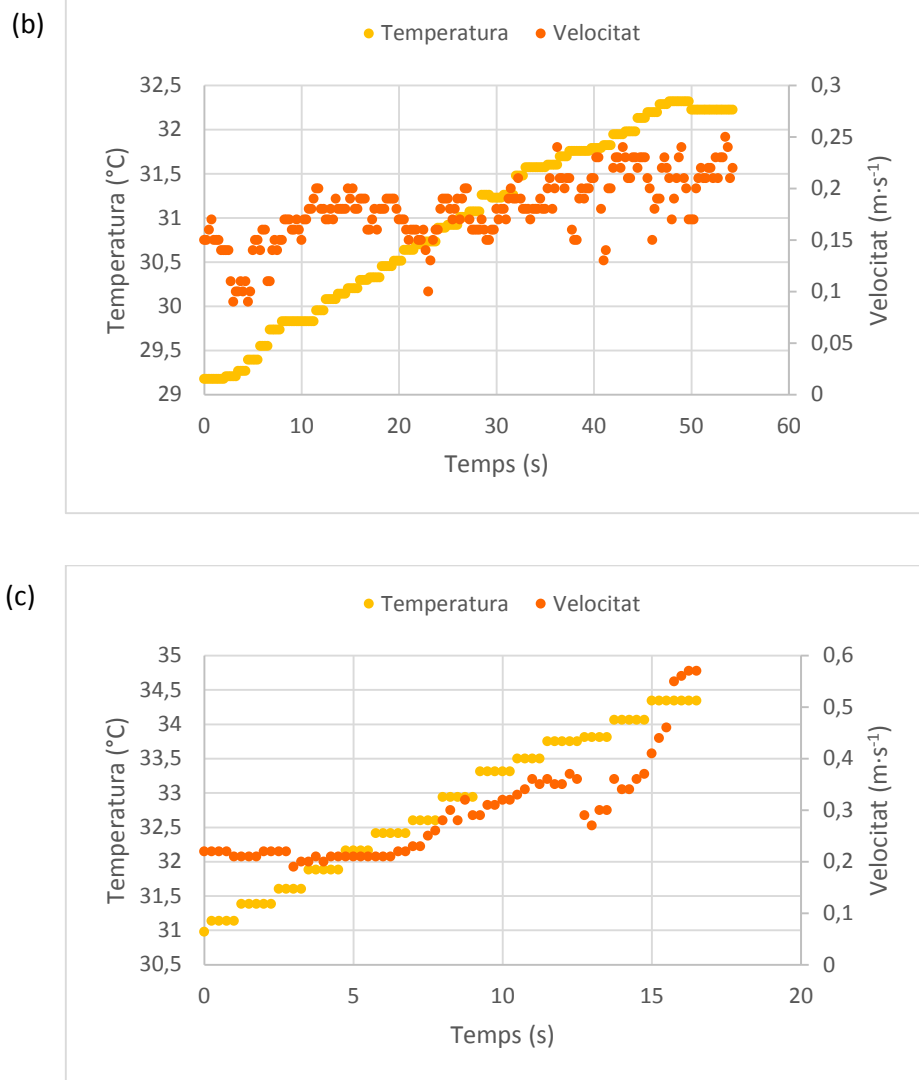


Figura D.1. Representació del núvol de punts velocitat de l'aire-temperatura per cada segon. (a) W25 (b) W50 (c) W100

Pel bloc W100 i W25 es detecta un augment de la velocitat de l'aire d'entrada a la flama a l'apropar-se el front a l'anemòmetre. Aquesta tendència no és tant clara pel bloc W50. Tanmateix es pot afirmar que les velocitats augmenten a l'augmentar l'escala. Aquest fet està en concordança amb l'observació que l'incendi és més intens pel bloc W100 que pel W50 i W25. A la Taula D.2 es mostra l'anàlisi estadístic de la velocitat d'entrada de l'aire a la flama.

Taula D.2. Resultats obtinguts de la velocitat d'entrada d'aire a la flama

Bloc	Velocitat mitjana d'entrada, u_i [m·s ⁻¹]	Desviació estàndard, SD [m·s ⁻¹]	Velocitat màxima, [m·s ⁻¹]	Velocitat mínima, [m·s ⁻¹]
W25	0,13	0,019	0,15	0,08
W50	0,18	0,032	0,25	0,09
W100	0,29	0,096	0,57	0,19

La diferència entre el valor màxim i mínim detectat augmenta a l'augmentar l'escala. Aquest fet és lògic donat el comportament polsant del foc. La velocitat d'entrada de l'aire té un ordre de magnitud semblant pels tres blocs. No obstant, la velocitat calculada pel bloc W50 és més propera a la calculada pel bloc W25. Finalment, les dades calculades donen una idea del règim dels tres experiments.

Finalment, cal recordar que per aquest estudi s'ha considerat la magnitud de la velocitat en valor absolut. El sentit de la velocitat era cap a l'interior de la flama.

E. DETERMINACIÓ DE LA SENSIBILITAT DE LA VELOCITAT MÀXIMA DE CREMA

Per tal de determinar si el paràmetre *VEG_BURNING_RATE_MAX* afecta significativament al resultat de les simulacions, es va realitzar un estudi de sensibilitat d'aquest paràmetre pels blocs W50 i W100. En aquest apartat s'exposa la metodologia i criteris seguits per determinar la sensibilitat, el disseny de les simulacions i els resultats obtinguts.

E.1. METODOLOGIA DE L'ANÀLISI DE SENSIBILITAT

Per realitzar l'estudi de sensibilitat es segueix la metodologia exposada a Bartelink [36]. Es realitza per a cada paràmetre tres simulacions. A la primera simulació el paràmetre estudiat adopta el valor establert per defecte al cas base. A les dues restants el paràmetre estudiat adopta un valor incrementat un 10% i disminuït també un 10%, respectivament. Emprant els resultats obtinguts es calcula el coeficient de sensibilitat o sensibilitat relativa mitjançant l'Equació 22.

$$RS = \frac{|R_{+10\%} - R_{-10\%}|}{0,2 R} \quad \text{Equació 22}$$

On RS és la sensibilitat relativa, $R_{+10\%}$ és la variable de sortida resultat de la simulació on el paràmetre estudiat s'incrementa un 10% el seu valor per defecte, $R_{-10\%}$ és la variable de sortida resultant de la simulació on el paràmetre disminueix un 10% el seu valor per defecte i R és el valor de la variable de sortida resultant de la simulació on el paràmetre adopta el seu valor per defecte.

El grau de sensibilitat es determina amb el valor de la sensibilitat relativa. Els valors de RS inferiors a 0,5 indiquen insensibilitat i sensibilitat baixa si es troben entre 0,5 i 1. Si RS és superior a 1 però menor de 2, la sensibilitat és moderada i és alta si és superior a 2. A partir d'aquest barem és possible detectar els paràmetres sensibles.

E.2. DISSENY DE LES SIMULACIONS

Tal com s'ha comentat, es va determinar la sensibilitat al model matemàtic de la velocitat de crema. Per això, es partia d'un escenari base. L'escenari base es definia tal com s'exposa a l'apartat 6.1 i la força d'arrossegament es definia segons la sèrie KC – veure la Taula 6.10 – on la constant d'arrossegament era de 0,159 i el coeficient d'arrossegament es calculava a partir de la correlació per partícules cilíndriques. En aquest cas la velocitat de crema adoptava el valor bibliogràfic extret de Pérez [30] i és de $1,09 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ pel bloc W50 i de $0,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ pel bloc W100 – veure la Taula 6.7. El bloc W25 no es sotmet a l'anàlisi de sensibilitat ja que s'ha comprovat que el front no propagava – veure l'apartat 6.3.

Per cada bloc es van simular dos casos més: incrementant un 10% i disminuint un 10% el valor de la velocitat de crema. Tenint en compte que el cas base ja s'havia realitzat en l'estudi sobre com definir la força d'arrossegament – veure l'apartat 6.2 –, es van realitzar un total de 4 simulacions. El disseny de simulacions s'exposa a la Taula E.1.

Les simulacions van ser executades en ordre aleatori mitjançant un total de 8 ordinadors: 4 ordinadors de característiques Intel® Core i5 amb 4GB de RAM, un disc dur de 150 GB de capacitat i una targeta gràfica de 128 MB de RAM i 4 ordinadors de característiques Intel® Core i7 amb 4GB de RAM, un disc dur de 150 GB de capacitat i una targeta gràfica de 128 MB de RAM.

Taula E.1. Disseny de les simulacions

Bloc	Variació	Velocitat màxima de crema, $R_{MC} [kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}]$
W50	-10%	0,981
	+10%	1,2
W100	-10%	0,513
	+10%	0,627

E.3. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Els resultats obtinguts de l'anàlisi de sensibilitat s'exposen a la Taula E.2.

Taula E.2. Resultats obtinguts de l'anàlisi de sensibilitat

Bloc	Variació	Velocitat màxima de crema, $R_{MC} [kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}]$	Velocitat de propagació, $R [m \cdot min^{-1}]$	Coefficient de regressió, r^2	Error relatiu, [%]	Coefficient de sensibilitat	Grau de sensibilitat
W50	-10%	0,981	0,178	0,976	-6,81	0,69	Baix
	Cas base	1,09	0,196	0,971	+2,62		
	+10%	1,2	0,205	0,984	+7,33		
W100	-10%	0,513	0,203	0,874	-45,7	1,46	Moderat
	Cas base	0,57	0,237	0,879	-36,63		
	+10%	0,627	0,272	0,919	-27,2		

La sensibilitat de la velocitat de crema pel bloc W50 és baixa mentre que pel bloc W100 és moderada. Aquest fet es pot veure a la Figura E.1 on el pendent de la recta que dibuixen els resultats obtinguts és més pronunciat pel bloc W100 que pel bloc W50. Tot plegat indica que la velocitat de crema és un paràmetre més influent als resultats per bloc W100 i que, per tant, s'ha d'avaluar el més acuradament possible.

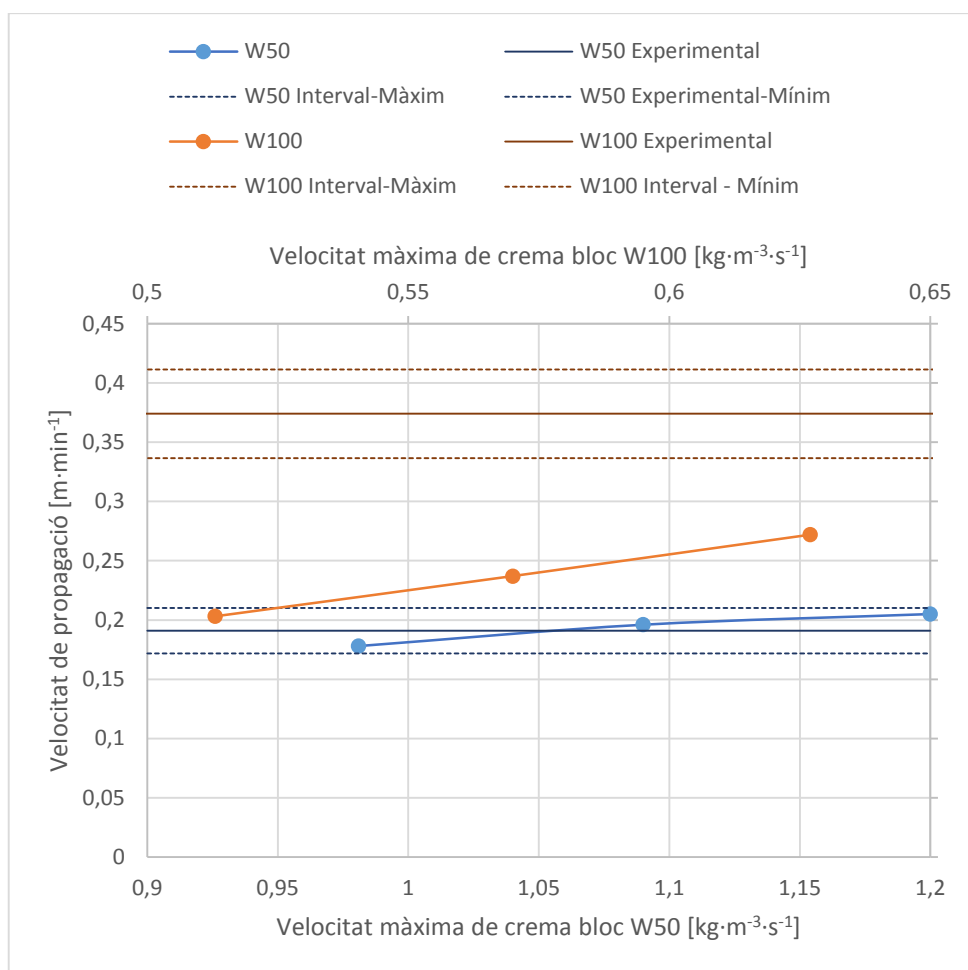


Figura E.1. Representació dels resultats obtinguts a l'estudi de sensibilitat

A més a més, si es té en compte l'error relatiu calculat amb l'error experimental així com la representació dels resultats obtinguts es pot corroborar que la dependència de la velocitat de propagació amb la velocitat de crema és lineal i que, pel bloc W50 es creua la línia d'error nul, mentre que pel bloc W100 convindria augmentar el valor per apropar-se a l'error nul. Aquests resultats suggereixen que seria necessari determinar acuradament i experimentalment la velocitat de crema.